

**VIGA DE CONCRETO MICRO-REFORZADO PARA LOSAS  
PREFABRICADAS EN EDIFICACIONES DE USO  
RESIDENCIAL**

**LUIS VILLEGAS NEGRETTE**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**María del Pilar Duque Uribe**

**Maestría en Ingeniería Civil con Énfasis en Estructuras**



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA**

**INGENIERÍA CIVIL**

**ENVIGADO**

**2012**

Este proyecto va dedicado a todas las personas que han estado a mi lado en cada uno de los momentos de alegría y tristeza, especialmente a mi madre que ha sido la persona que me ha apoyado en cada etapa de mi vida. Gracias, muchas gracias.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de estudiar en la Escuela de Ingeniería de Antioquia - EIA. Centro educativo donde crecí como persona y me desarrollé como profesional.

Agradezco a los directivos que me acompañaron en mi desarrollo profesional. A Paula Madrid Barboto por haberme acogido cuando decidí cambiar de profesión y por sus consejos oportunos, a Ana María Zambrano por motivar a cada uno de los estudiantes a continuar con sus sueños y a mi profesora, directora de carrera y directora de trabajo de grado María del Pilar Duque Uribe, por haber sido una de las personas más influyentes en mi formación profesional y no haberme abandonado en el momento que más la necesite. Gracias por su confianza, tolerancia, paciencia y dedicación. Gracias, muchas gracias.

Agradezco a mis profesores que con su esmero lograron hacer de mí un Ingeniero Civil integro desde lo técnico, lo social y lo personal. Considero que su labor se cumplió sumamente bien. Gracias, muchas gracias.

Agradezco al personal de biblioteca, laboratorios y servicios generales de la EIA que me ayudaron a hacer cada una de las labores necesarias para sacar este proyecto adelante. Gracias, muchas gracias.

Gracias a la empresa SUMIGLAS S.A. por el interés que le presto al proyecto, la confianza que depositó en el mismo y sus aportes desde lo técnico y lo material. Sin su ayuda no se hubiera podido lograr. Gracias, muchas gracias.

Gracias a la empresa Construcciones Capital S.A. por su contribución con el cemento. Gracias, muchas gracias.

Gracias al Ingeniero Civil Christian Blanco Esteban por su gran ayuda con la elaboración de la evaluación económica del proyecto. Gracias, muchas gracias.

Gracias a mis compañeros de universidad, quienes de una u otra me apoyaron y me brindaron su amistad. Particularmente a mis colegas y grandes amigos: Daniel Vergara Aguilar, Pablo Jiménez Tatis, Andrés Peláez Olano, Juan Felipe Giraldo Rincón, Emiro Alejandro López Sepúlveda, Diego Fernando Paredes Peña y especialmente a Cristian Camilo Londoño Piedrahita. Gracias, muchas gracias.

Por último y no menos importante a mi familia. Especialmente mi madre. Gracias, muchas gracias por ser tú la que motivará y propiciará mi formación profesional. Te estaré eternamente agradecido.

# CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. PRELIMINARES.....	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	15
1.2.1 Objetivo General.....	15
1.2.2 Objetivos Específicos .....	15
1.3 MARCO DE REFERENCIA .....	15
1.3.1 Antecedentes .....	16
1.3.2 Fibras .....	17
1.3.3 Diseño Convencional de Elementos Tipo Viga .....	17
Flexión .....	17
Cortante .....	22
1.3.4 Fallas de Elementos a Flexión.....	23
2. METODOLOGÍA.....	25
2.1 SELECCIÓN DEL MICRORREFUERZO .....	25
2.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO .....	25
2.2.1 Tamaño de la Muestra.....	26
2.2.2 Ensayo a Compresión .....	26
2.2.3 Ensayo a Flexión .....	26
2.3 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LAS VIGAS MICRORREFORZADAS para la CARACTERIZACIÓN MECÁNICA.....	28
2.3.1 Diseño Preliminar de las Vigas .....	28

2.3.2	Diseño de Mezcla para Concreto de 21 MPa y Diferentes Dosificaciones de Fibra	28
2.3.3	Construcción de las Vigas de Caracterización .....	29
2.4	VIGA DE CONCRETO MICRORREFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO ÁLCALI-RESISTENTE CEM FIL HP 67/36 PARA EDIFICACIONES DE USO RESIDENCIAL ..	30
3.	DESARROLLO DEL PROYECTO .....	31
3.1	SELECCIÓN DEL MICRORREFUERZO .....	31
3.1.1	Propiedades Mecánicas de los Microrrefuerzos Identificados en la Bibliografía .....	31
3.1.2	Selección del Elemento Microrreforzante.....	34
3.2	CONSTRUCCIÓN DE LA VIGA.....	35
3.2.1	Viga .....	65
	De los Cilindros .....	76
	De las Vigas .....	78
3.3	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA VIGA .....	81
3.4	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE VIGAS MICRORREFORZADAS COMO ELEMENTOS PREFABRICADOS PARA EDIFICACIONES DE USO RESIDENCIAL .....	81
	Desde el punto de vista económico.....	81
	Desde el punto de vista técnico.....	84
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	85
5.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES .....	87
	Recomendaciones. ....	87
	Posibles Temas de Investigación. ....	88

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Dimensiones permitidas por la ASTM C470 para cilindros de concreto.....	29
Tabla 2. Propiedades mecánicas de los elementos identificados como microrrefuerzos en la revisión bibliográfica.....	31
Tabla 3. Diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto de 21 MPa. ....	35
Tabla 4. Diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto de 21 MPa, corregido por humedad. ....	36
Tabla 5. Dosificación para cilindros.....	36
Tabla 6. Dosificación para vigas de caracterización.....	36
Tabla 7. Prueba de compresión a los 7 días de cilindros con diferentes dosificaciones de fibra. ....	46
Tabla 8. Prueba de compresión a los 28 días de cilindros con diferentes dosificaciones de fibra. ....	49
Tabla 9. Prueba de compresión a los 7 días de cilindros repetidos con diferentes dosificaciones de fibra. ....	52
Tabla 10. Prueba de compresión a los 28 días de cilindros repetidos con diferentes dosificaciones de fibra. ....	54
Tabla 11. Falla de vigas de caracterización con cero por ciento de fibra a los catorce días. ....	59
Tabla 12. Falla de vigas de caracterización con cero por ciento de fibra a los veintiocho días.....	61
Tabla 13. Diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto de 21 MPa. ....	72
Tabla 14. Diseño de mezcla para tres vigas de concreto 21 MPa con aditivo y dos con fibra. ....	73
Tabla 15. Prueba de compresión de cilindros con diferentes dosificaciones de fibra a diferentes edades. ....	76
Tabla 16. Falla de vigas.....	78
Tabla 17. Deformaciones.....	79

# LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Curva esfuerzo Vs. deformación del concreto simple. Tomada de (Nilson, 2001). .....	16
Figura 2. Esquema de fuerzas internas de una viga a flexión y su bloque de esfuerzos. Tomada de (James G. MacGregor, 2009)......	19
Figura 3. Rectángulo equivalente de Whitney. Tomada de (James G. MacGregor, 2009). .....	21
Figura 4. Agrietamiento de tensión en la zona de mayor momento de una viga de concreto simple. Tomada de (The Northeast Forest University, 2007), traducida y modificada. ....	23
Figura 5. Agrietamiento de tensión diagonal de vigas de concreto reforzado con acero. Tomada de (Nilson, 2001). ....	24
Figura 6. Esquema de la máquina de ensayo a flexión. Tomada de (American Standard Methods, 2010) y traducida al español. ....	28
Figura 7. Metodología para la realización de mezclas de concreto con fibras de vidrio álcali resistentes Cem FIL HP 67/36 (Owens Corning, s. f.)......	30
Figura 8. Molde para cilindros de concreto. ....	38
Figura 9. Formaleta para vigas de caracterización.....	39
Figura 10. Construcción formaleta de vigas de caracterización. ....	40
Figura 11. Realización mezcla para cilindros y vigas de caracterización. ....	42
Figura 12. Vaciado.....	43
Figura 13. Curado de cilindros y de vigas de caracterización. ....	44
Figura 14. Prensa neumática. ....	45
Figura 15. Falla de cilindros. ....	46
Figura 16. Falla de cilindros de concreto a los 7 días con diferentes porcentajes de fibra. .....	48
Figura 17. Falla de cilindros a los 28 días de concreto con diferentes porcentajes de fibra a los.....	50
Figura 18. Comparación entre cilindros vibrados con varilla y con vibrador. ....	51

Figura 19. Falla a los 7 días de cilindros repetidos de concreto con diferentes porcentajes de fibra. ....	53
Figura 20. Falla de cilindros repetidos a los 28 días de concreto con diferentes porcentajes de fibra. ....	55
Figura 21. Resumen de resultados de los cilindros de concreto con diferentes dosificaciones de fibras.....	56
Figura 22. Resumen de resultados de los cilindros repetidos de concreto con diferentes dosificaciones de fibras.....	56
Figura 23. Marco de carga.....	57
Figura 24. Falla de vigas de caracterización.....	58
Figura 25. Falla de vigas de caracterización con diferentes dosificaciones de fibra los catorce días.....	61
Figura 26. Falla de vigas de caracterización con diferentes dosificaciones de fibra los veintiocho días.....	64
Figura 27. Resumen de resultados de las vigas de caracterización de concreto con diferentes dosificaciones de fibras.....	64
Figura 28. Sección de losa.....	65
Figura 29. Carga muerta típica de un nervio de tres metros de una edificación de uso residencial. Figura del programa SAP2000.....	68
Figura 30. Carga viva típica de un nervio de tres metros de una edificación de uso residencial. Figura del programa SAP2000.....	68
Figura 31. Diagrama de cortante típico de un nervio de tres metros de una edificación de uso residencial. Figura del programa SAP2000.....	68
Figura 32. Diagrama de momento típico de un nervio de tres metros de una edificación de uso residencial. Figura del programa SAP2000.....	69
Figura 33. Despiece nervio típico de tres metros para edificaciones de uso residencial. .	69
Figura 34. Despiece nervio de tres metros con cuantía mínima.....	70
Figura 35. Formaleta vigas .....	70
Figura 36. Prueba de Asentamiento.....	73
Figura 37. Vigas vaciadas.....	74
Figura 38. Curado de vigas.....	74



Figura 39. Pruebas finales. ....	76
Figura 40. Resumen de resultados de los cilindros finales de concreto con diferentes dosificaciones de fibras.....	78
Figura 41. Fallas de vigas. ....	80
Figura 42. Fallas de una viga de concreto reforzada con acero sometida a flexión. Tomada de (James G. MacGregor, 2009). ....	80
Figura 43. Evaluación económica de una viga de concreto prefabricado de 20 cm x 10 cm y 3 m de longitud con acero para edificaciones de uso residencial. ....	82
Figura 44. Evaluación económica de una viga de concreto prefabricado de 20 cm x 10 cm y 3 m de longitud con acero de cuantía mínima y con 2% de fibra de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36. ....	83
Figura 45. Evaluación económica de una viga de concreto prefabricado de 20 cm x 10 cm y 3 m de longitud con 2% de fibra de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36. ....	83

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo 1. Prueba de Absorción. ....	92
Anexo 2. Carta de compromiso por parte de SUMIGLAS S.A. para la entrega del 80% de la cantidad de fibra necesaria para el proyecto. ....	93

## RESUMEN

El desconocimiento de las características que presentan los elementos prefabricados en elementos estructurales en nuestro medio, ha conllevado a la no utilización de estos de forma masiva.

En este trabajo de grado se analizó el comportamiento mecánico de una viga rectangular de unas dimensiones específicas de concreto con cierta cantidad de microrrefuerzo bajo condiciones de carga controladas hasta el momento de falla y la pertinencia de su implementación en la industria del prefabricado como elemento estructural para losas prefabricadas en edificaciones de uso residencial. Para cumplir con esta meta se realizaron las siguientes acciones:

Primero – Se seleccionó el microrrefuerzo a implementar, por medio de la revisión bibliográfica.

Segundo – Se construyó la viga con el microrrefuerzo seleccionado y con la dosificación que mejores resultados dio, de la falla de 30 vigas de caracterización con diferentes dosificaciones y corrigiendo las dificultades que se evidenciaron.

Tercero – Se caracterizó el comportamiento mecánico de la viga construida a través de un ensayo de flexión controlado.

Cuarto – Se evaluaron las ventajas y desventajas de la implementación de ese tipo de elementos prefabricados desde lo económico y lo técnico.

Todo esto se hizo cumpliendo los lineamientos de los ensayos de: mezclas de concreto, pruebas de compresión y de flexión, tal y como lo establece la NTC y la ASTM (que corresponda), y del diseño estructural en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), obteniendo finalmente que la implementación de este tipo de elementos es parcialmente viable al término del año 2012.

## **ABSTRACT**

Ignorance of the characteristics shown by structural precast elements in our environment has prevented it from being used massively.

In this paper, the mechanical behavior of a rectangular beam of specific dimensions made of concrete with a dosage of micro reinforcement under controlled loading conditions until failure and the relevance of its implementation in the precast industry as a prefabricated structural slab for residential buildings have been analyzed. the following steps were carried out:

First – selection of the micro reinforcement to be implemented. it was selected through the literature review.

Second – building of a beam with the selected micro reinforcement and the dosage which gave better results after the failure of 30 characterization beams with different dosages of micro reinforcement and correcting the problems that arose.

Third - characterization of the mechanical behavior of the built beam. this step was developed through a controlled bending test.

Fourth – evaluation of the advantages and disadvantages of implementing such prefabricated from the economic and technical view.

All this was carried out according with testing guidelines of: concrete mixes, compression and bending tests, as it is established by the NTC and the ASTM (as appropriate), and the Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Finally, the implementation of such elements is partially viable by the end of 2012.

## INTRODUCCIÓN

La construcción tradicional que abunda en nuestro medio, ha generado el desconocimiento de la posibilidad de la utilización de elementos prefabricados. Particularmente en este trabajo de grado se ahondará en la identificación, caracterización mecánica y evaluación de la implementación de un microrrefuerzo para la construcción de vigas de concreto microrreforzado de losas prefabricadas para edificaciones de uso residencial en Colombia y particularmente para el Valle de Aburrá, cumpliendo las normatividades que sean del caso.

De esta manera este trabajo tuvo como propósito caracterizar mecánicamente un tipo de viga de concreto microrreforzado, con el fin de establecer las ventajas y desventajas de utilización de éste frente al concreto reforzado tradicional para la construcción de losas prefabricadas en edificaciones de uso residencial.

Para esto se hizo una revisión de la literatura técnica donde se reportar el uso de fibras en el concreto, los resultado de esto se presenta en la sección 3.1, se ensayaron 30 vigas de caracterización y 55 cilindros para identificar los problemas que se presentaron y darles solución, para finalmente elegir la dosificación que mejores resultados presentó y proceder a construir una viga de concreto microreforzado, para hacer una evaluación de su comportamiento mecánico y la factibilidad económica de su implementación en el medio, como elemento estructural prefabricado, siguiendo la metodología que se presenta en el capítulo 2.

# **1. PRELIMINARES**

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Tradicionalmente se ha utilizado el concreto reforzado como el material predilecto para las construcciones de nuestro medio, bien sea por costumbre, falta de oferta de sustitutos o por desconocimiento de un material que ofrezca como mínimo las mismas prestaciones de resistencia mecánica, durabilidad, manejabilidad, economía, facilidad de consecución de los materiales y su versatilidad.

Mucho se ha venido investigando para tratar de reemplazar los componentes del concreto reforzado con el objetivo de tener alternativas que permitan sustituir los agregados pétreos del concreto simple y al acero del concreto reforzado, que al menos permitan tener las mismas prestaciones del material actual, pero que presenten ventajas en cuanto a un peso menor, de manera que permita facilitar los procesos constructivos. Una de las alternativas planteadas para la sustitución del acero en el concreto reforzado ha sido la utilización de elementos que puedan ser embebidos en la mezcla de concreto con una dosificación específica y que primordialmente logren suplir la debilidad a tracción del mismo (función principal del acero en el concreto reforzado). Es así como se ha venido evaluando la utilización de diferentes tipos de materiales para ser embebidos en el concreto (microrrefuerzo). Sin embargo, en Colombia pocas veces se ha pasado de una simple evaluación a la implementación en el diseño y menos aún en la construcción.

En Colombia se implementa particularmente la construcción tradicional en los proyectos de vivienda de baja altura, que por lo general conlleva a solicitudes mayores en las estructuras y demandan un tiempo de construcción considerable en relación con las construcciones modulares con elementos prefabricados. Ahora bien, la concepción de sistemas prefabricados para losas implica considerar primordialmente la geometría y el material. Estos son factores de suma importancia, dado que gracias a ellos, se logra optimizar la sección efectiva y generar la reducción del peso de los elementos, de manera que posibilita el transporte y manipulación (manoportable) sin tener que incurrir en la utilización de maquinaria robusta para esta tarea, de forma que se reducen las demandas de equipos y personal calificado para la manipulación de los elementos y a su vez se incrementa el rendimiento de la construcción. En vista de esto es factible la utilización de estos sistemas en la construcción en general y como ejemplo particular de casos aplicables se tienen las vigas en un sistema estructural de pórticos e incluso los nervios de una losa unidireccional.

Por lo tanto, este proyecto pretende mostrar los beneficios de la implementación del concreto microrreforzado en el diseño de vigas que puedan llegar a ser utilizadas como elementos prefabricados en sistemas de pisos de dimensiones específicas, de manera que se pueda tener una evaluación objetiva frente a la implementación de los nuevos desarrollos del concreto y de los nuevos métodos constructivos y generar un cambio en la arraigada cultura tradicional del concreto reforzado e incentivar el uso de elementos prefabricados.

## **1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.2.1 Objetivo General**

Caracterizar mecánicamente un tipo de viga de concreto microrreforzado, con el fin de establecer las ventajas y desventajas de utilización de éste frente al concreto reforzado tradicional para la construcción de losas prefabricadas en edificaciones de uso residencial.

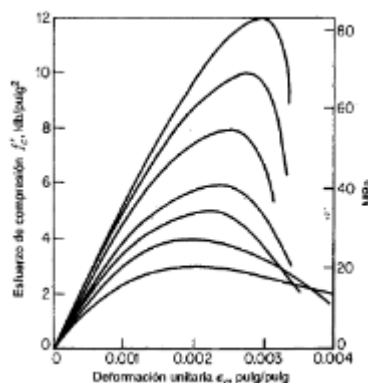
### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Seleccionar el tipo de microrrefuerzo a implementar en la mezcla de concreto microrreforzado de acuerdo con las prestaciones mecánicas establecidas en investigaciones ya realizadas por terceros.
- Construir una viga de concreto microrreforzado de dimensiones específicas con el microrrefuerzo seleccionado.
- Evaluar el desempeño mecánico de la viga construida a través del análisis de su comportamiento mecánico bajo condiciones de carga controladas hasta el momento de falla del elemento.
- Identificar las ventajas y desventajas de la implementación del microrreforzamiento de concreto para la fabricación de elementos tipo viga para losas prefabricadas para edificaciones de uso residencial en Colombia.

## **1.3 MARCO DE REFERENCIA**

El concreto es un material sintético compuesto por cemento, agregados pétreos, agua y aditivos. Una adecuada dosificación de cada uno de estos elementos condicionará el comportamiento final de la mezcla, es decir, condicionará su consistencia, su manejabilidad y por último, pero no menos importante, la resistencia mecánica del material compuesto.

Cuando se habla de la resistencia mecánica del concreto, generalmente se refiere a la resistencia a los esfuerzos de compresión, ( $f'_c$ ). La forma como se determina el esfuerzo último de compresión es a partir de un ensayo de compresión simple que se encuentra reglamentado por la ASTM C 39 y la NTC 673. Con éste ensayo debidamente instrumentado se puede obtener una gráfica de esfuerzo deformación, lo cual ayuda a comprender de manera adecuada el comportamiento del material. Una gráfica típica del ensayo de compresión para una muestra de concreto simple se muestra en la figura 1.



**Figura 1. Curva esfuerzo Vs. deformación del concreto simple. Tomada de (Nilson, 2001).**

De esta gráfica se evidencia que el comportamiento del concreto es el de un material frágil, típico de materiales cerámicos, donde la resistencia a la tracción es mínima. Según reportes de ensayos a la tracción en muestras de concreto, esta sólo llega a ser alrededor del 10 % del  $f'_c$  (Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales).

Es así como el concreto simple es un material que presenta una gran debilidad a tracción y debe ser suplida para poder ser utilizado en miembros estructurales tipo viga o en columnas sometidas a esfuerzos de flexo-compresión. De esta manera nace el concreto reforzado, el cual se considera un material compuesto por concreto y otro material que sea compatible con él y a la vez sea capaz de soportar adecuadamente diferentes esfuerzos por solicitaciones que contengan tracción y compresión.

### 1.3.1 Antecedentes

La adición de elementos reforzantes al concreto se da paralelamente al desarrollo del mismo. Es así como en 1874 se presenta la primera patente del uso de fibras de acero en el cemento (Álvarez A. B., 2010). Este fue el primer registro formal del uso de un refuerzo en este material. En 1899 se desarrolló el asbesto cemento (otra manera de reforzar el cemento con fibras), material que tuvo una gran acogida hasta que se reportaron casos de cáncer en las personas; no fue hasta la década de los 60 que se dio el auge del desarrollo del concreto reforzado con fibras (acero, vidrio, polipropileno, entre otras), pero dado el alto costo que implicaba la adquisición de las mismas, no se le dio el alcance necesario para llegar a ser altamente investigado e implementado en la época, de modo que simplemente solo se logró usar fibras naturales para la fabricación de elementos no estructurales, con resultados medianamente satisfactorios en cuanto al incremento de la capacidad a tracción del concreto (CD3WD).

Recientemente, y debido a que los precios de las fibras han disminuido en relación con los de la década de los 60, se han desarrollado una serie de investigaciones dónde se ha indentificado extensamente el comportamiento de elementos de concreto recubiertos en su periferia con fibras de carbono, del concreto microrreforzado con fibras de acero (Dong Joo Kim, 2011), plástico (H-T Hu, 2010), polipropileno (Huanzi Wnag, 2011) y fibra de vidrio (P. Asokan, 2010). Donde se han reportado mejoras en el comportamiento frágil del



concreto y en la capacidad portante del mismo a compresión como resultado de la adición a la mezcla del concreto simple del microrrefuerzo de fibras. Sin embargo, no se ha llegado a hacer una formulación para el diseño de elementos estructurales de concreto microrreforzado.

Recientemente se ha empezado a adicionar fibras de acero (Dong Joo Kim, 2011) y de materiales sintéticos como el PVA (Poli Vinil Alcohol) (Sammer Hamoush, 2010) a elementos tipo viga, para identificar su comportamiento y tratar de desarrollar una formulación que permita el diseño de este tipo de elementos con ese material, sin llegar a obtener resultados. Es así cómo actualmente no tenemos una metodología de diseño de elementos estructurales tipo viga con concreto microrreforzado.

### **1.3.2 Fibras**

Las fibras son elementos que podrán ser naturales, metálicas o sintéticas. Estos elementos han sido utilizados para suplir la debilidad de materiales frágiles desde la época de los egipcios, hasta hoy en día.

Diversos estudios han demostrado que son capaces de incrementar la ductilidad del concreto, aumentar la resistencia a la compresión y la tracción (IMCYC, 2007) y que la forma como son dosificadas es por porcentaje del peso del concreto (ACI Committee, 1999) (IMCYC, 2003).

### **1.3.3 Diseño Convencional de Elementos Tipo Viga**

Es bastante conocido que las solicitaciones a las que se somete principalmente un elemento tipo viga son: flexión y cortante. Para atender éstas solicitaciones de diseño, es necesario elegir que metodología se usará. Entre las metodologías de diseño de elementos estructurales nos encontramos con el método de diseño por esfuerzos admisibles y el de la resistencia última.

El primero es sumamente útil para el diseño con materiales donde su comportamiento mecánico es poco conocido, éste se basa en determinar el comportamiento mecánico de elementos que con configuraciones determinadas son capaces de soportar e implementar factores de seguridad que garanticen un comportamiento satisfactorio. Mientras que el segundo es el método más utilizado para el diseño de miembros estructurales donde se tiene cierto grado de conocimiento del material. El método consiste en comparar la capacidad última de una sección, con la demanda última. La capacidad última se encuentra al multiplicar la capacidad nominal por un factor de reducción de resistencia ( $\Phi$ ) y la demanda última se determina al multiplicar las cargas de servicio por unos factores de amplificación que dependen del tipo de carga, su incertidumbre y su periodicidad.

Antes de llegar a desarrollar este último tema y su aplicación en el diseño de concreto reforzado en elementos tipo viga, es necesario conocer un poco de la teoría elástica aplicada a este tipo de elementos.

#### **Flexión**

Para el diseño de flexión se identifican los puntos de momento máximo que debe atender y se compara con el momento resistente que es capaz de soportar la sección.

Para la teoría elástica, se espera que el comportamiento de un miembro a flexión obedezca la siguiente ecuación, ampliamente verificada en la mecánica clásica:

$$f = -\frac{My}{I}$$

Donde:

$f$ : esfuerzo axial de tracción o compresión a una distancia  $y$  del eje neutro o eje de esfuerzos cero..

$M$ : momento resistente.

$y$ : distancia desde el eje neutro.

$I$ : inercia de la sección.

De la ecuación anterior, se puede obtener un esfuerzo máximo de compresión en la fibra extrema a compresión del elemento estructural y un esfuerzo máximo a tracción en la fibra opuesta. Al esfuerzo máximo a tracción por flexión se le conoce como esfuerzo de rotura o módulo de ruptura (MOR) (Hibbeler, 2006) . Cuando se tiene conocimiento del módulo rotura evaluada en la fibra más traccionada ( $y = h - c$ ), se dice que se ha determinado el máximo valor absoluto de esfuerzo, lo que conduce a una ecuación de la forma:

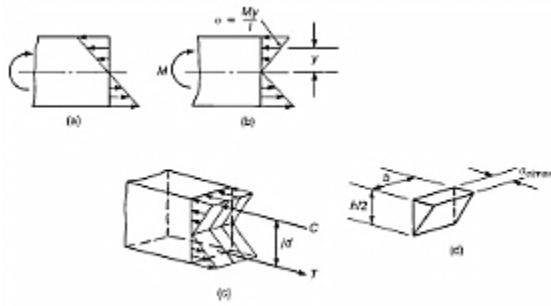
$$f = -\frac{M(h - c)}{I}$$

Donde:

$C$ : es la distancia desde el eje neutro a la fibra más comprimida

$h$ : es la altura del elemento.

La fuerza de compresión resultante ( $C$ ) en la zona del miembro trabajando a compresión, se obtiene como la resultante del volumen de los esfuerzos  $f$  cuando éste varía linealmente con la distancia al eje neutro. Este mismo criterio, en materiales elásticos y lineales, se utilizar para encontrar la resultante a tracción, tal y como se muestra en la figura 2.



**Figura 2. Esquema de fuerzas internas de una viga a flexión y su bloque de esfuerzos. Tomada de (James G. MacGregor, 2009).**

Considerando una variación lineal de los esfuerzos y una sección transversal simétrica, se tiene que fuerzas resultantes a tracción y compresión se pueden determinar a partir de:

$$C = \frac{\sigma_{c(\max)}}{2} * \left( \frac{bh}{2} \right)$$

Una forma simplificada de determinar el momento nominal de una sección, es considerar el momento ejercido por ese par de fuerzas que constituyen la resultante de los esfuerzos a compresión y a tracción.

$$M = C * jd$$

O

$$M = T * jd$$

$M$ : momento nominal resistente.

$T$ : fuerza a tracción del momento equivalente a la sollicitación máxima.

$C$ : fuerza a compresión del momento equivalente a la sollicitación máxima.

$jd$ : distancia efectiva entre la zona a compresión y la de tracción.

Si  $C$  es igual a  $T$ , las ecuaciones anteriormente expresadas son estáticas y se pueden aplicar directamente a cualquier tipo de material que se comporte linealmente.

Si se quiere determinar el momento máximo soportado por la sección, se puede reemplazar en la ecuación de flexión el valor máximo resistido por el material, tanto a esfuerzos de tracción como de compresión. El menor de los dos es el que rige la capacidad de la sección.

Por otro lado, si lo que se quiere es realizar una verificación de una sección predeterminada sometida a flexión, el esfuerzo axial máximo se puede determinar directamente de la formula de flexión mencionada anteriormente, este esfuerzo se

compara con los máximos resistidos por el material y así se determina si la sección es apta o no.

En el caso del concreto simple, su poca resistencia a la tracción hace que los momentos resistentes sean mínimos.

Adicionalmente, si se quisiera aplicar esta ecuación para el diseño de miembros de concreto, se debe trabajar a niveles muy bajos de esfuerzos, donde todavía se podría considerar como un material lineal, lo que desafortunadamente desaprovecha las grandes cualidades del concreto a compresión.

Para el diseño de elementos de concreto reforzado en sus fibras sometidas a tracción, la teoría elástica no se cumple del todo, por esto se opta por considerar su comportamiento como el de un miembro compuesto, una zona de compresión soportada directamente por el concreto y una zona de tracción, soportada totalmente por el acero de refuerzo, despreciando el trabajo del concreto a tracción.

Para el diseño de vigas de concreto reforzado con varillas de acero en su zonas solicitadas a tracción (construcción convencional), con el método de la resistencia última, debido a la no linealidad en la curva esfuerzo deformación del concreto y considerando que se diseña hasta la rotura, se utilizan métodos que simplifican la forma de la curva haciendo más sencillo el cálculo de los momentos nominales. Una de estas gráficas simplificadas es el rectángulo equivalente de esfuerzos de Whitney, el cual constituye el método simplificado más aceptado en las metodologías de diseño de concreto reforzado. Cuando se realiza un diseño por esfuerzos admisibles, en vista que se trabaja en un nivel bajo de esfuerzos, la curva del concreto se puede considerar lineal.

Diseño de concreto reforzado a flexión por medio del rectángulo equivalente de Whitney. :

Hipótesis del método:

El esfuerzo en la zona a compresión se considera uniforme con un valor equivalente a  $0,85 * f'_c$ .

Donde:

$f'_c$ : esfuerzo último a compresión del concreto.

1. El rectángulo equivalente tiene una altura  $a = \beta_1 * c$

Donde:

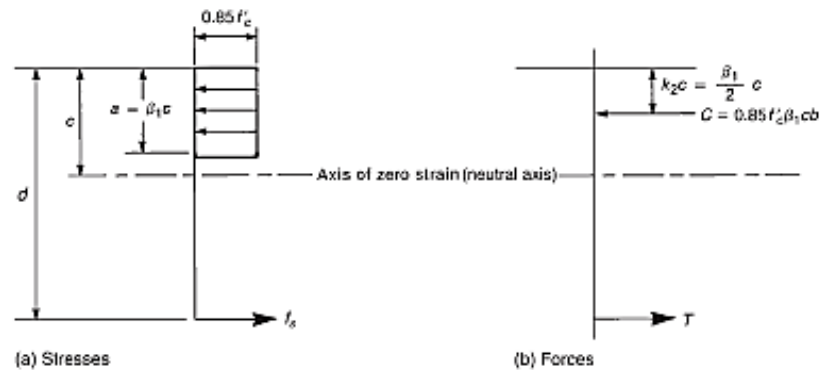
$c$ : distancia del extremo de compresión al eje neutro.

2. La fuerza de compresión  $C$  encuentra aplicada a  $k_2 * c$  veces de la fibra más comprimida de la sección al eje neutro. Donde  $k_2 = \frac{\beta_1}{2}$ .

- a.  $\beta_1$  debe ser:

- i. 0,85 para concreto con resistencia menor o igual a 4000 psi.
- ii.  $0,85 - 0,05 * \frac{f'_c - 4000}{1000}$ , para concreto con resistencia mayor que 4000 psi y menor o igual a 8000 psi.  $f'_c$  debe estar en psi.
- iii. Para concreto con resistencia superior a 8000 psi se deberá usar un valor de 0,65.

Un esquema del rectángulo equivalente de Whitney se presenta en la figura 3.



**Figura 3. Rectángulo equivalente de Whitney. Tomada de (James G. MacGregor, 2009).**

Así una vez se determina  $C$ , asumiendo que la compresión la resiste solo el concreto, se determina la fuerza de tracción,  $T$ , teniendo en cuenta que la resiste el acero. Así:

$$C = T$$

Y

$$T = A_s * f_y$$

Donde:

$A_s$ : área de acero.

$f_y$ : esfuerzo de fluencia del acero.

De esta manera al tratar de despejar las ecuaciones anteriores se nos presenta irresoluble (dos incógnitas para una ecuación) desde el punto de vista estático, de modo que se ha de considerar la capacidad de deformación de los materiales y la teoría de Bernoulli, donde las secciones planas permanecen planas y por lo tanto las deformaciones son proporcionales a la distancia al eje neutro.

$$\frac{\varepsilon_s}{d - c} = \frac{\varepsilon_c}{c}$$

Donde:

$\varepsilon_s$ : deformación unitaria del acero.

$\varepsilon_c$ : deformación unitaria del concreto.

Asumiendo que el acero fluirá se tendrá que:

$$\varepsilon_s \geq \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$$

Donde:

$f_y$ : esfuerzo de fluencia del acero.

$E_s$ : módulo de elasticidad del acero.

Finalmente se podrá decir:

$$M_n = T * \left(d - \frac{a}{2}\right) = C * \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

O

$$M_n = A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

Finalmente se hace una verificación del estado de deformaciones de los materiales, garantizando que la sección sea sub-reforzada (James G. MacGregor, 2009) y que:

$$\phi * M_n \geq M$$

Cortante

Para determinar la capacidad de un elemento de concreto de soportar carga a cortante, se debe:

1. Identificar el cortante último. Éste debe ser menor o igual que el cortante nominal por el factor de reducción por cortante.
2. Determinar la capacidad de carga del concreto simple así:

$$a. V_c = 0,17 * \lambda * b * d * \sqrt{f'_c}$$

Donde:

$\lambda$ : factor.

La ecuación anterior debe ser usada para el Sistema Internacional de unidades

3. Calcular la demanda adicional por solicitaciones de cortante que deberá suplir el acero. Así:

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c = \frac{A_v * f_y * d}{s}$$

Donde:

$A_v$ : área de la varilla de acero.

$s$ : separación entre estribos.

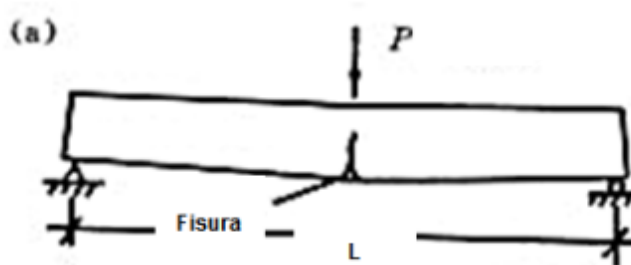
$$s < \frac{d}{2}$$

Esta determinación se debe de hacer bajo el cumplimiento de la normatividad regional de diseño (James G. MacGregor, 2009).

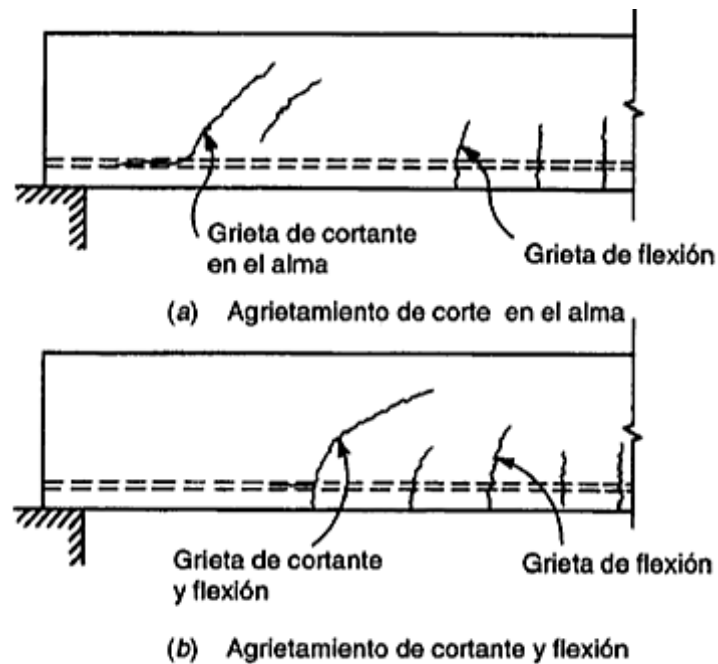
A pesar de que un elemento se diseñe para ciertas condiciones y con cierto grado de confiabilidad, en muchas ocasiones se presentan las fallas de los estos. Estas, se producen ya sea por un inadecuado proceso constructivo, un diseño mal concebido o por excedencia de las solicitaciones para las que se diseñó. Bien sea por un motivo u otro, esto siempre nos deja una lección y una reflexión.

#### 1.3.4 Fallas de Elementos a Flexión

Cuando se sobrepasan las cargas de diseño de los elementos sometidos a flexión, es inminente que éste deje de funcionar tal y como se concibió en la etapa de diseño. De esta manera y particularmente para los elementos de concreto simple y los elementos de concreto reforzado con acero, tenemos que el comportamiento típico de estos es el que se presenta en la figura 4 y la figura 5 respectivamente.



**Figura 4. Agrietamiento de tensión en la zona de mayor momento de una viga de concreto simple. Tomada de (The Northeast Forest University, 2007), traducida y modificada.**



**Figura 5. Agrietamiento de tensión diagonal de vigas de concreto reforzado con acero. Tomada de (Nilson, 2001).**

De las figuras anteriores vale la pena decir que la forma de falla obedece al tipo de material (frágil o dúctil), a la trayectoria de los esfuerzos y la forma como se conciba el mecanismo de falla (que falle primero el concreto o el acero).



## **2. METODOLOGÍA**

Con el fin de lograr cumplir los objetivos que se plantearon en la sección 1.2, se presenta la metodología de manera consecutiva a cada objetivo específico, es así como la sección 2.1 corresponde al primer objetivo, la 2.2 y 2.3 al segundo y parte del tercero y finalmente la 2.4 al tercero y al cuarto.

### **2.1 SELECCIÓN DEL MICRORREFUERZO**

Para seleccionar el tipo de microrrefuerzo a implementar en las vigas se revisó la bibliografía de los elementos reportados en los artículos de las revistas científicas de las bases de datos, en los libros técnicos, en trabajos de grado y en los catálogos de productos ofertados por los distribuidores locales como elementos microrreforzantes del concreto, para así, lograr identificar la compatibilidad con el concreto, las propiedades mecánicas de éstos a tracción (que fuera mayor que la del acero), la densidad (menor que la del acero), la disponibilidad en el medio, la capacidad ofertada, el precio de adquisición (que fuera menor o cercano al del acero) y la falta de investigación en su implementación en elementos estructurales tipo viga.

Los resultados y el análisis de los mismos se encuentran en la sección 3.1, de modo que se recomienda la lectura de ésta para comprender porqué se seleccionó la fibra de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36.

### **2.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO**

Con el fin de obtener las características mecánicas de una viga rectangular de concreto microrreforzado con fibras de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36 de unas dimensiones determinadas; se realizaron ensayos de compresión simple y de flexión sobre una muestra representativa de cilindros y vigas de caracterización a edades y dosificaciones de microrrefuerzo diferentes, bajo las recomendaciones del reporte 544 del ACI y la ASTM C192 y siguiendo las metodologías descritas en la ASTM C39 y en la ASTM C293.

Los resultados de los ensayos permitieron determinar y correlacionar la resistencia a compresión y el módulo de rotura del concreto microrreforzado con fibras de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36 a diferentes edades, y así evidenciar si la relación que algunos autores han determinado entre la resistencia a compresión y el módulo de rotura del concreto simple (entre el 8% y el 20% de la resistencia a compresión (Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales)), también se cumplía para este concreto. Adicionalmente, se hizo para identificar la dosificación de fibras que reportará mejores resultados, para a partir de esta dosificación construir una viga de 3 m de longitud por 0,1 m de anchura y 0,2 m de altura (por ser dimensiones comunes en vigas de losas para edificaciones de uso residencial), para caracterizarla mecánicamente y evaluar desde un punto de vista técnico y económico las ventajas y desventajas de la implementación de la fibra de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36 en el concreto para la construcción de

elementos tipo viga en losas prefabricadas para edificaciones de uso residencial en Colombia.

### **2.2.1 Tamaño de la Muestra**

El número de vigas de caracterización ensayadas se determinó a partir de lo que se encuentra establecido en el reporte 544 del ACI y la ASTM C192. Así, se definió que se ensayarían tres vigas de caracterización por dosificación (5 en total) en los días 14 y 28 después de vaciada la mezcla.

Éstas vigas de caracterización, estuvieron acompañadas de tres cilindros por dosificación que debían ser ensayados en los días 7 y 28 después de vaciada la mezcla.

De esta forma, para cada dosificación se ensayaron seis cilindros y seis vigas.

### **2.2.2 Ensayo a Compresión**

Objeto del Ensayo a Compresión

Determinar la resistencia a compresión de especímenes de cilíndricos de concreto.

De acuerdo con lo que establece la ASTM C39 y la NTC 673 los cilindros de concreto que serán sometidos a pruebas de compresión, han de mantenerse húmedos durante el intervalo de tiempo en el que son removidos del almacenamiento húmedo hasta la ejecución del ensayo, ser ubicados correctamente entre las placas de apoyo inferior y superior, y estar alineado con el eje del elemento con el que se aplica la carga.

La máquina con la que se debe desarrollar la prueba, ha de tener su indicador de carga en cero, propiciar una tasa de aplicación de carga continua, a velocidad constante y sin impactos, hacer esto hasta que el indicador de carga muestre una disminución constante de la carga que soporta y el cilindro presente una forma de falla definida. Esta ha de estar calibrada de acuerdo con la ASTM E4, debe ser operada por medio de electricidad y transmitir una carga tal y como se mencionó con anterioridad, tener precisión en donde el porcentaje de error de las cargas no exceda por exceso o por defecto el uno por ciento (1 %) de la carga indicada, contar con bloques de apoyo de acero con caras endurecidas, uno de los cuales debe tener un asiento esférico y ser operada por un operario con experiencia certificada.

Como resultado de este ensayo se ha de reportar el número de identificación del espécimen, el diámetro y la longitud (si se encuentra fuera del rango de 1,8 a 2,2 veces el diámetro), el área de la sección transversal en milímetros cuadrados ( $\text{mm}^2$ ), la carga máxima en *kiloNewtons* (kN), la resistencia a la compresión calculada a los 0,1 MPa más cercanos, el tipo de fractura, defectos en el espécimen y la edad del mismo.

### **2.2.3 Ensayo a Flexión**

Objeto del Ensayo a Flexión

Obtener el módulo de rotura (MOR) de las vigas rectangulares de concreto.

De acuerdo con lo que se dispone en la ASTM C293 las vigas deben ser ensayadas tan pronto como sean removidas del almacenamiento húmedo, se ha de posicionar el espécimen de prueba entre los apoyos y el centro de aplicación de carga proporcionándole una carga entre el tres y el seis por ciento de la carga última estimada, se debe aplicar la carga a una tasa continua y sin impactos de 0,9 y 1,2 MPa/min.

Una vez el espécimen haya fallado, se deberá calcular el módulo de rotura así:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Donde:

*R*: módulo de rotura, MPa.

*P*: máxima carga aplicada indicada por la máquina de ensayos, N.

*L*: longitud de espaciamiento entre los apoyos, mm.

*b*: ancho promedio del espécimen en la fractura, mm.

*d*: altura promedio del espécimen en la fractura, mm.

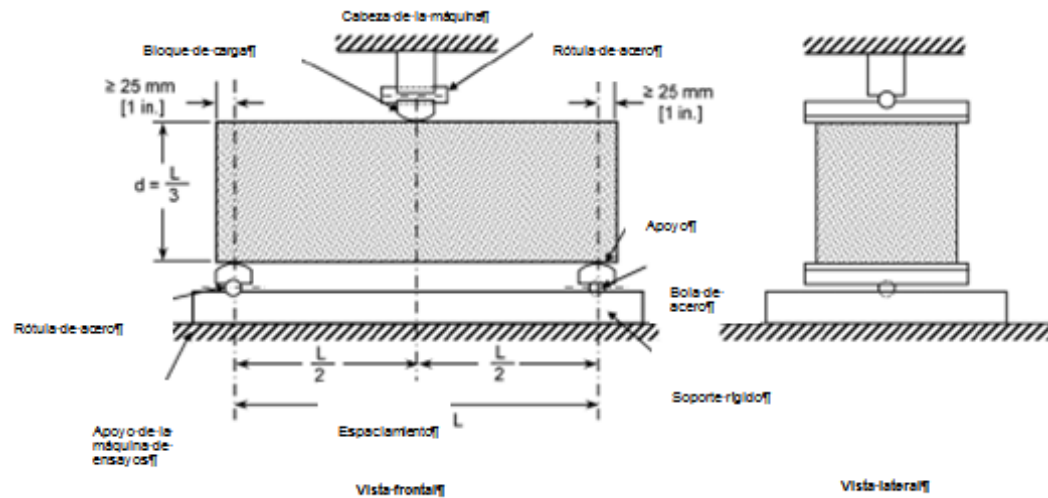
Como resultado se ha de reportar el número de identificación del espécimen, el ancho promedio en la fractura al milímetro más cercano, la altura promedio en la fractura al milímetro más cercano, la longitud de espaciamiento entre los apoyos en milímetros, la carga máxima aplicada en *Newtons* (N), el módulo de rotura calculado al 0,05 MPa más cercano, defectos en el espécimen y la edad del mismo.

### **Aparatos y Equipos**

La máquina de ensayos ha de cumplir los requerimientos de la ASTM E4.

Máquinas que no provean una carga continua hasta la falla, no son permitidas.

La carga ha de ser suministrada por un bloque de carga en el punto de aplicación de la misma y dos apoyos para el espécimen configurados tal y como lo ilustra la figura 6.



**Figura 6. Esquema de la máquina de ensayo a flexión. Tomada de (American Standard Methods, 2010) y traducida al español.**

La carga se debe aplicar perpendicularmente a la cara del espécimen y sin excentricidades.

## **2.3 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LAS VIGAS MICRORREFORZADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA**

### **2.3.1 Diseño Preliminar de las Vigas**

De acuerdo con las sugerencias establecidas por la norma ASTM C31, se definió que las dimensiones de las vigas de caracterización mecánica fueran de 15 cm de ancho, por 15 cm de alto y 50 cm de longitud. Garantizando que la relación entre la longitud y la altura fuera mayor que tres y que la relación entre la altura y la anchura menor que 1,5.

### **2.3.2 Diseño de Mezcla para Concreto de 21 MPa y Diferentes Dosificaciones de Fibra**

El diseño de mezcla para el concreto se ha de llevar a cabo siguiendo la metodología que se describe en el capítulo once del libro Tecnología del Concreto y del Mortero de Diego Sánchez de Guzmán (Gúzman, 1993), y adicionándole un porcentaje determinado del peso del concreto en fibras, tal como se mencionó en 1.3.1. Para este proyecto se definió que el porcentaje fuese cero, dos, tres, cuatro y cinco, porque son rangos que están dentro de lo que se encontró en la literatura recolectada de las fibras.

### 2.3.3 Construcción de las Vigas de Caracterización

#### Formaleta

Se han de usar moldes que cumplan lo establecido por la ASTM C470 para los cilindros de concreto y construirlos para las vigas, en correspondencia con lo que se estableció en la sección 2.3.1.

Así, los cilindros podrían ser los que se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1. Dimensiones permitidas por la ASTM C470 para cilindros de concreto.**

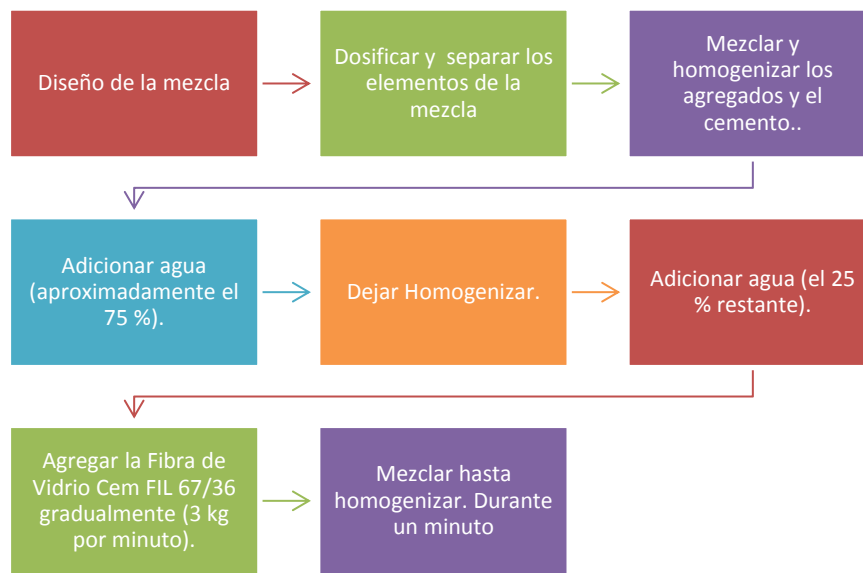
Diámetro (mm)
75
100
150
225
>225

Los moldes que se usarán para los cilindros serán de 100 mm de diámetro y los de las vigas de 15 cm de ancho, por 15 cm de alto y 50 cm de largo. Esto se evidencia en la figura 8 y la figura 10 respectivamente.

#### Mezcla

Se usará la metodología sugerida por el fabricante de las fibras de vidrio álcali resistentes Cem FIL HP 67/36.

En esa metodología se expone que la mezcla se deberá realizar así:



**Figura 7. Metodología para la realización de mezclas de concreto con fibras de vidrio álcali resistentes Cem FIL HP 67/36 (Owens Corning, s. f.).**

### **Curado**

El curado deberá cumplir con lo que dispone la ASTM C31 o la ASTM C192.

### **Falla**

La falla de los cilindros se deberá realizar a los 7 y los 28 días de realizada la mezcla, y la de las vigas de caracterización a los 14 y a los 28 días, de acuerdo con lo que se estableció en la sección 2.2.1.

Las pruebas han de hacerse en conformidad con lo que se dispuso en las secciones 2.2.2 y 2.2.3, respectivamente.

## **2.4 VIGA DE CONCRETO MICRORREFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO ÁLCALI-RESISTENTE CEM FIL HP 67/36 PARA EDIFICACIONES DE USO RESIDENCIAL**

Una vez se obtengan los resultados de los ensayos de los cilindros y las vigas de caracterización se elegirá la dosificación que mejores resultados reporte, se construirá una viga con reemplazo total del acero por las fibras de vidrio álcali resistentes Cem FIL HP 67/36 con esta, otra con reemplazo parcial (con cuantía mínima) bajo la misma dosificación de fibras y otra de concreto reforzado diseñada de forma típica para solicitaciones de carga de edificaciones de uso residencial. Finalmente se ha de hacer una evaluación técnica de las capacidades portantes y el comportamiento de las vigas y una relación costo-beneficio.

### 3. DESARROLLO DEL PROYECTO

#### 3.1 SELECCIÓN DEL MICRORREFUERZO

##### 3.1.1 Propiedades Mecánicas de los Microrrefuerzos Identificados en la Bibliografía

En la tabla 2 se presenta la información recolectada a través de la revisión bibliográfica de investigaciones desarrolladas en la implementación de elementos microrreforzantes en el hormigón, entrevistas con empresas distribuidoras de los elementos y con profesionales de las áreas de Ingeniería Civil y de Materiales; con su respectiva caracterización mecánica.

**Tabla 2. Propiedades mecánicas de los elementos identificados como microrrefuerzos en la revisión bibliográfica.**

Tipo de Fibra	Fibra	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Gravedad Específica	E (GPa)	Resistencia a la Tracción (MPa)	Referencia
Sintética	Vidrio					
Sintética	A	2460,000	2,460	64,813	3102,750	(American Concrete Institute, 2002)
Sintética	E	2540,000	2,540	71,708	3447,500	(American Concrete Institute, 2002); (Goez, Viera, & Sierra, 1987)
Sintética	Cem FIL AR	2700,000	2,700	78,603	2482,200	(American Concrete Institute, 2002); (Owens Corning, s. f.)
Sintética	NEG AR	2740,000	2,740	79,982	2447,725	(American Concrete Institute, 2002)
Sintética	Aramida					
Sintética	I	1440,000	1,440	62,055	2930,375	(American Concrete Institute, 2002)
Sintética	II	1440,000	1,440	117,215	2344,300	(American Concrete Institute, 2002)
Sintética	Carbón					
Sintética	PAN HM	1600 – 1700	1,600 - 1,700	379,915	2482,200 - 3033,800	(American Concrete Institute, 2002)
Sintética	PAN HT	1600 – 1700	1,600 - 1,700	230,293	3447,500 - 3999,100	(American Concrete Institute, 2002); (Goez Y. d.,

						2012)
Sintética	<i>Pitch GP</i>	1600 – 1700	1,600 - 1,700	27,580 - 34,475	482,650 - 792,925	(American Concrete Institute, 2002); (Goez Y. d., 2012)
Sintética	<i>Pitch HP</i>	1800 – 2150	1,800 - 2,150	151,690 - 482,650	1379,000 - 3102,750	(American Concrete Institute, 2002); (Goez Y. d., 2012)
Sintética	Acrílico	1160 – 1180	1,160 - 1,180	13,790 - 19,306	268,905 - 999,775	(American Concrete Institute, 2002); (Goez Y. d., 2012)
Sintética	Nylon	1140,000	1,140	5,171	965,300	(Andrejs Krasnikovs, 2007); (Goez Y. d., 2012); (Wang, Wu, & Li, 2000); (American Concrete Institute, 2006)
Sintética	Poliéster	1340 – 1390	1,340 - 1,390	17,238	227,535 - 1103,200	(American Concrete Institute, 2002); (Goez Y. d., 2012); (A. Sivakumar, 2007)
Sintética	Polietileno	920 - 960	0,920 - 0,960	4,999	75,845 - 586,075	(American Concrete Institute, 2002); (Goez Y. d., 2012)
Sintética	Polipropileno	900 - 910	0,900 - 0,910	3,448 - 4827	137,900 - 689,500	(Wang, Wu, & Li, 2000); (A. Sivakumar, 2007); (American Concrete Institute, 2006)
Sintética	Poliamida	0,000		3,900 - 6,000	700 - 1000	(Banthia); (Goez Y. d., 2012)
Sintética	Polivinil Alcohol	0,000		29 - 40	800 - 1500	(Banthia); (Razmig Shamim, 2009); (Goez Y. d., 2012)
Sintética	Poliacrilonitrilo	0,000		17 - 18	850 - 1000	(Banthia); (Goez Y. d., 2012)
Sintética	Pulpa de Polietileno	0,000		-	-	(Banthia); (Goez Y. d., 2012)
Sintética	Polietileno de Alta Densidad	0,000		117,000	2585,000	(Banthia); (Goez Y. d., 2012)
Natural	Coco	1120 -	1,120 -	18,961 -	119,973 - 199,955	(American Concrete



		1150	1,150	25,994		Institute, 2002); (Gómez & Mejía, 2012); (Ali, 2012); (Goez Y. d., 2012)
Natural	Sisal	-	-	12,963 - 25,994	275,800 - 568,148	(American Concrete Institute, 2002); (Ali, 2012); (Goez Y. d., 2012)
Natural	Bagazo de Caña de Azúcar	1200 - 1300	1,200 - 1,300	14,997 - 18,961	183,752 - 289,590	(American Concrete Institute, 2002); (Saraz, Aristizabal, & Mejía, 2007); (Ali, 2012); (Goez Y. d., 2012)
Natural	Bamboo	1500,000	1,500	32,958 - 39,991	349,921 - 499,888	(American Concrete Institute, 2002); (Ali, 2012); (Goez Y. d., 2012)
Natural	Yute	1020 - 1040	1,020 - 1,040	25,994 - 31,993	249,944 - 349,921	(American Concrete Institute, 2002); (Ali, 2012); (Goez Y. d., 2012)
Natural	Lino	-	-	99,978	999,775	(American Concrete Institute, 2002); (Ali, 2012); (Goez Y. d., 2012)
Natural	Pasto Elefante	-	-	4,895	177,891	(American Concrete Institute, 2002); (Goez Y. d., 2012)
Natural	Caña del Agua	-	-	5,171	68,950	(American Concrete Institute, 2002); (Goez Y. d., 2012)
Natural	Plátano	-	-	1,379	91,704	(American Concrete Institute, 2002); (Goez Y. d., 2012)
Natural	Musamba	-	-	0,896	82,740	(American Concrete Institute, 2002); (Goez Y. d., 2012)
Natural	Fibra de Madera (celulosa)	1500,000	1,500	-	699,843	(American Concrete Institute, 2002); (Goez Y. d., 2012)

Natural	Asbesto	3200,000	3,200	69 - 150	600 - 3600	(Banthia); (Edward G. Nawy, 2008)
Natural	Algodón	1500,000	1,500	4,800	400 - 700	(Edward G. Nawy, 2008); (Ali, 2012); (Goez Y. d., 2012)
Natural	Grafito	1900,000	1,900	230 - 415	100 -260	(Edward G. Nawy, 2008); (Goez Y. d., 2012)
Natural	Rayón	0,000		11 - ...	450 - 1100	(Edward G. Nawy, 2008)
Natural	Rayón (alta tenacidad)	1500,000	1,500	6,900	720 - 860	(Edward G. Nawy, 2008)
Natural	Lana de Roca (Escandinavia )	2700,000	2,700	0,600	500 - 760	(Edward G. Nawy, 2008); (Goez Y. d., 2012)
Metálica	Acero de Bajo Carbón	7800,000	7,800	200,000	280 -2000	(Andrejs Krasnikovs, 2007); (American Concrete Institute, 1999); (A. Sivakumar, 2007)
Metálica	Acero de Alto Carbón	7800,000	7,800	200,000	3000,000	(Banthia); (Dong Joo Kim, 2011); (American Concrete Institute, 1999); (A. Sivakumar, 2007)
Metálica	Acero Inoxidable	7800,000	7,800	200,000	3000,000	(Banthia); (Dong Joo Kim, 2011); (American Concrete Institute, 1999); (A. Sivakumar, 2007)

### 3.1.2 Selección del Elemento Microrreforzante

La selección del microrrefuerzo se hizo bajo la evaluación de la resistencia a tracción (mayor que la del acero), la densidad (menor que la del acero), la variación mínima de estas propiedades, la compatibilidad con el concreto, el precio de adquisición, la capacidad ofertada por los distribuidores y la carencia de investigación en su implementación en elementos estructurales tipo viga.

#### Fibra de Vidrio Álcali-Resistente Cem FIL HP 67/36

Una vez se tuvo la información de la tabla 2, se decidió que la mejor opción entre el grupo de fibras que allí se reportan eran las fibras sintéticas, dado que la compatibilidad de las fibras naturales está condicionada a la utilización de un procedimiento químico que permitan estabilizarlas para que no se deterioren y las metálicas ya están siendo

investigadas para ser implementadas en elementos estructurales tipo viga (Dong Joo Kim, 2011). Entre el grupo de las fibras sintéticas, se ve que las que mejores propiedades mecánicas las reportan las fibras de vidrio, carbono y aramida, pero al hablar con los distribuidores locales el costo de un kilogramo de éstas al termino del 2012, se identificó que las que eran más asequibles eran las fibras de vidrio (9.800 \$/kg).

Entre las fibras de vidrio que se comercializan en el medio, existen muchas referencias, pero particularmente las fibras de vidrio álcali resistentes Cem FIL HP 67/36, son las que presenta una alta compatibilidad con el concreto desde el punto de vista de la estabilidad química, reporta excelentes propiedades mecánicas a tracción (1700 MPa), una densidad de aproximadamente un tercio del acero ( $2700 \text{ kg/m}^3$ ), muestra un precio asequible (9.800 \$/kg), el distribuidor presenta una alta capacidad de oferta de la misma y no se ha desarrollado investigación en su implementación como elemento microrreforzante en elementos estructurales y particularmente es la única fibra de vidrio que se ha utilizado como remplazo total del acero en pisos industriales (Grisales, 2012).

Esta fibra son hilos de una longitud promedio de 3,5 cm y en la que por un kilogramo de ésta hay 200 millones de microfibras (Owens Corning, s. f.).

### 3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA VIGA

Tal y como se planteó en el título 2, se construyeron 30 vigas de caracterización acompañadas por cilindros antes de construir la viga de concreto microrreforzado con fibras de vidrio álcali resistentes Cem FIL HP 67/36. La forma de hacerlo fue:

#### 1. Diseño de Mezcla.

El diseño de mezcla que se presenta a continuación fue suministrado por el Ingeniero Civil Ph.D. en Reducción del Riesgo Sísmico, Carlos Andrés Blandón Uribe. De este diseño vale la pena aclarar que el tamaño máximo nominal –TMN- definido por la ASTM C31 corresponde a la tercera parte de la menor dimensión de la sección de la viga, de esta manera se aceptará como TMN agregados de 50 mm (150 mm/3).

El TMN que se utilizó para la mezcla fue de 19,05 mm (3/4 in).

**Tabla 3. Diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto de 21 MPa.**

Dosificación para un metro cúbico de concreto	
Cemento (kg)	360
Grava (kg)	949
Arena (kg)	888
Agua (l)	188

Vale la pena aclarar que la dosificación presentada en la tabla 3 corresponde a una humedad de agregados finos del 7 % y del 0,6% para los agregados gruesos, y que a la hora de realizar la mezcla la humedad era 6,65 % y 0,5%, respectivamente, de modo que

se realizó una corrección por humedad en la mezcla y finalmente se obtuvieron los resultados de la tabla 4.

**Tabla 4. Diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto de 21 MPa, corregido por humedad.**

Dosificación para un metro cúbico de concreto	
Cemento (kg)	360
Grava (kg)	949
Arena (kg)	888
Agua (l)	192

Así, se procedió a realizar la dosificación correspondiente a los cilindros y a las vigas, obteniéndose los resultados de la tabla 5 y la tabla 6, respectivamente.

**Tabla 5. Dosificación para cilindros.**

Cilindro		Cemento (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	Agua (l)	Fibras de Vidrio (kg)	Dosificación Fibras (% del peso del Concreto)
Diámetro (m)	0,100	0,72	1,89	1,78	0,38	0,24	5,0%
Altura (m)	0,200					0,19	4,0%
Área (m <sup>2</sup> )	0,008					0,15	3,0%
Volumen (m <sup>3</sup> )	0,002					0,10	2,0%
Número de Cilindros con Fibra	24	17,28	45,36	42,72	9,12	4,08	
Número de Cilindros sin Fibra	6	4,32	11,34	10,68	2,28	0,00	
Total		21,60	56,70	53,40	11,40	4,08	


**Tabla 6. Dosificación para vigas de caracterización.**

Vigas de Caracterización		Cemento (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	Agua (l)	Fibras de Vidrio (kg)	Dosificación Fibras (% del peso del Concreto)
Anchura (m)	0,150	3,96	10,44	9,77	2,11	1,32	5,00%
Altura (m)	0,150					1,05	4,00%
Longitud (m)	0,500					0,80	3,00%
Volumen (m <sup>3</sup> )	0,011					0,53	2,00%

Número de Vigas con Fibra	24	95,04	250,56	234,48	50,64	22,20
Número de Vigas sin Fibra	6	23,76	62,64	58,62	12,66	0,00
<b>Total</b>		118,80	313,20	293,10	63,30	22,20

## 2. Construcción.

Se usaron cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. En conformidad con lo que se presentó en tabla 1.

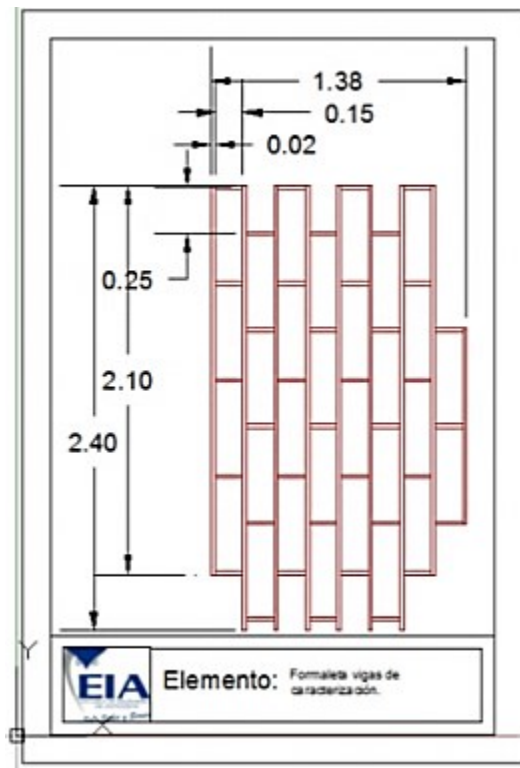
	
Medición del diámetro del cilindro	Medición de la altura del cilindro



Cilindro

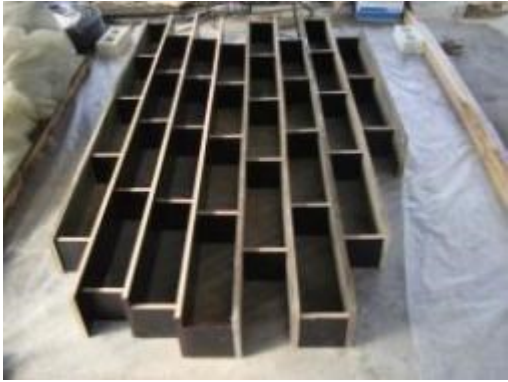
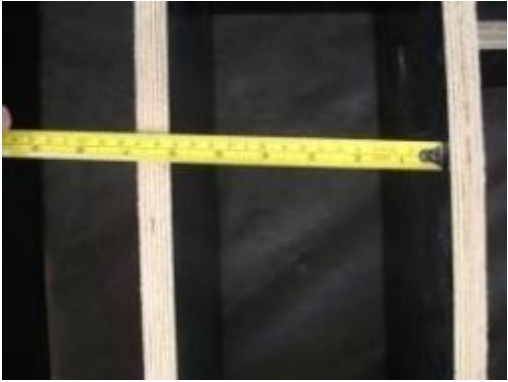
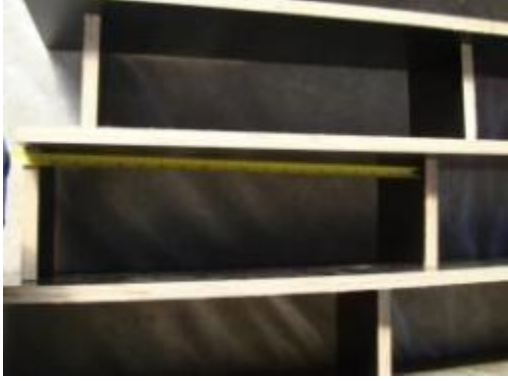
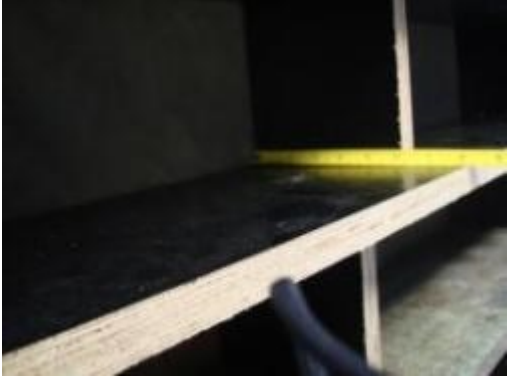
**Figura 8. Molde para cilindros de concreto.**

Se construyó la formaleta de las vigas de caracterización tal y como se ve en la figura 9 y figura 10.



**Figura 9. Formaleta para vigas de caracterización.**

	
<p>Espacio dispuesto para la construcción de la formaleta</p>	<p>Construcción de la formaleta</p>

	
<p>Formaleta</p>	<p>Medición de la anchura</p>
	
<p>Medición de la longitud</p>	<p>Medición de la altura</p>

**Figura 10. Construcción formaleta de vigas de caracterización.**

Una vez se tuvo la formaleta para las vigas, los moldes para los cilindros y el diseño de mezcla, se procedió a ejecutar la metodología que se ilustra en la figura 7.





Cemento



Agregado grueso



Agregado fino







Dosificación agregados



Fibra de vidrio Cem FIL HP 67/36



Dosificación fibra

	
<p>Deposición de los materiales</p>	
	
<p>Mezclado</p>	<p>Disposición previa al vaciado</p>

**Figura 11. Realización mezcla para cilindros y vigas de caracterización.**

### Vaciado

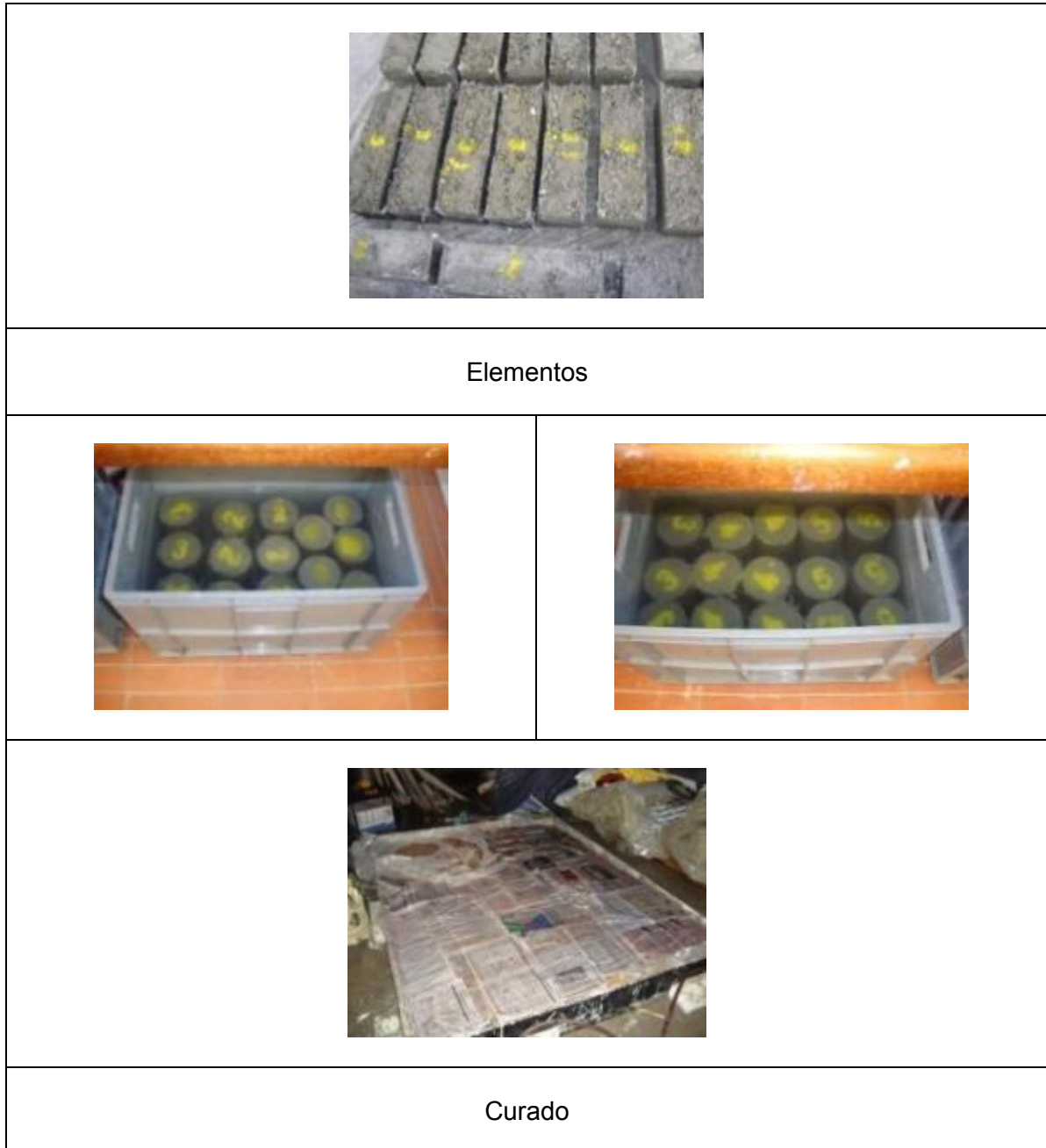
Después de realizada la mezcla esta se vació en los moldes como se muestra en la figura 12.

	
Vaciado	
	
Vibrado	
	
Elementos finales	

**Figura 12. Vaciado.**

### Curado

Se hizo el desencofrado de los cilindros y las vigas después de las 16 horas y antes de las 32, y se dispusieron en contenedores con agua y cal, de acuerdo a lo establecido por la ASTM C192.



**Figura 13. Curado de cilindros y de vigas de caracterización.**

### 3. Falla.

Vale la pena decir que primero se expondrán los resultados obtenidos de las pruebas de compresión y después los de flexión.

## Cilindros

### Prensa Neumática




Se utilizó una prensa neumática que cumpliera las directrices de la ASTM C39 para la prueba de resistencia a compresión de los cilindros de concreto.



**Figura 14. Prensa neumática.**

### Prueba

	
Espécimen	Colocación

	
Falla	Disposición
	
Lectura de Carga	

**Figura 15. Falla de cilindros.**

### Resultados

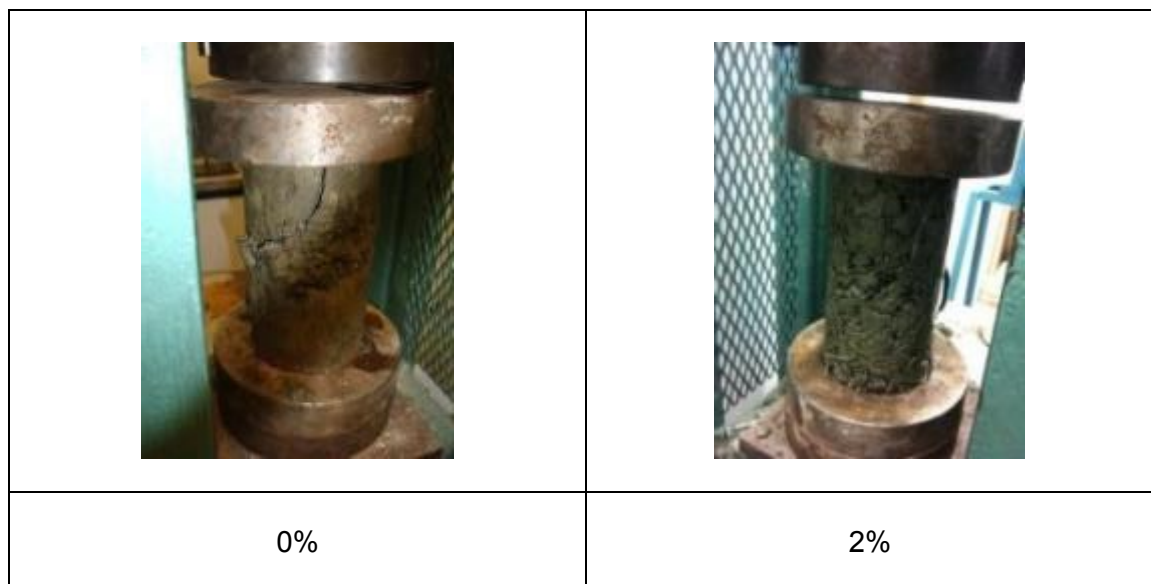
En las tablas 7 a 10 se presentan los resultados obtenidos de las fallas de los cilindros tal y como lo especifica la ASTM C39.

**Tabla 7. Prueba de compresión a los 7 días de cilindros con diferentes dosificaciones de fibra.**




Dosificación	0%					
ID	Diámetro (mm)	Área de Sección Transversal (mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (kN)	Tipo de Fractura	Defectos en el Espécimen	Edad del Espécimen (días)
00_07_01	100	7853,98	66,75	Cortante	Muchos poros	7
00_07_02	100	7853,98	104,58		Poros	7
00_07_03	100	7853,98	77,88			7

Dosificación	2%					
02_07_01	100	7853,98	20,03	No Aplica (NA) a lo que dispone la norma - Asentamiento	Matriz muy porosa	7
02_07_02	100	7853,98	22,25			7
02_07_03	100	7853,98	23,14			7
Dosificación	3%					
03_07_01	100	7853,98	21,81	NA - Asentamiento	Matriz muy porosa	7
03_07_02	100	7853,98	22,70			7
03_07_03	100	7853,98	17,80			7
Dosificación	4%					
04_07_01	100	7853,98	26,70	NA - Asentamiento	Matriz muy porosa	7
04_07_02	100	7853,98	12,02			7
04_07_03	100	7853,98	32,04			7
Dosificación	5%					
05_07_01	100	7853,98	37,83	Cono y cortante	Presencia de poros	7
05_07_02	100	7853,98	25,81		Muchos poros	7
05_07_03	100	7853,98	24,48			7

Muestra de lo que se reportó en la tabla 7 se presenta en la figura 16.





	
3%	4%
	
5%	

**Figura 16. Falla de cilindros de concreto a los 7 días con diferentes porcentajes de fibra.**

Los resultados a los 28 días de los cilindros vibrados con varilla no mostraron un cambio significativo en su comportamiento con respecto a los de los 7 días, se presentó un aumento mínimo en su resistencia pero esto posiblemente fue por la edad de la pasta de cemento. A continuación se presentan los resultados de los cilindros a los 28 días vibrados con varilla.






**Tabla 8. Prueba de compresión a los 28 días de cilindros con diferentes dosificaciones de fibra.**

Dosificación	0%					
ID	Diámetro (mm)	Área de Sección Transversal (mm²)	Carga Máxima (kN)	Tipo de Fractura	Defectos en el espécimen	Edad del espécimen (días)
00_28_01	100	7853,98	164,65	Columnar	Pocos poros	28
00_28_02	100	7853,98	191,35			28
00_28_03	100	7853,98	209,15			28
Dosificación	2%					
02_28_01	100	7853,98	26,70	Columnar.	Pocos poros.	28
02_28_02	100	7853,98	24,03			28
02_28_03	100	7853,98	17,80			28
Dosificación	3%					
03_28_01	100	7853,98	13,35	NA - Asentamiento	Matriz muy porosa.	28
03_28_02	100	7853,98	51,18			28
03_28_03	100	7853,98	37,83			28
Dosificación	4%					
04_28_01	100	7853,98	33,38	NA - Asentamiento	Matriz muy porosa.	28
04_28_02	100	7853,98	43,17			28
04_28_03	100	7853,98	32,04			28
Dosificación	5%					
05_28_01	100	7853,98	53,40	Columnar	Muchos poros.	28
05_28_02	100	7853,98	58,74			28
05_28_03	100	7853,98	53,40			28

Muestra de lo que se reportó en la tabla 8 se presenta en la figura 17.



0%	2%
	
3%	4%
	
5%	

**Figura 17. Falla de cilindros a los 28 días de concreto con diferentes porcentajes de fibra a los.**

Una vez se obtuvieron los resultados anteriormente reportados en la tabla 7 y la tabla 8 se decidió realizar otra muestra de cilindros con las mismas dosificaciones que se presentaron en la tabla 5 y cambiando el método de vibrado (en lugar de utilizar varilla se usó vibrador, en correspondencia con lo que presenta la ASTM C31). Obteniendo mejores resultados en la apariencia y en el comportamiento mecánico pero sin gran relevancia para dosificaciones mayores del dos por ciento del peso del concreto en fibras de vidrio álcali resistentes Cem FIL HP 67/36.

	
<p>Cilindros</p>	<p>Comparación entre los cilindros vibrados con varilla (parte frontal de la imagen) y los que fueron vibrados con vibrador (parte posterior de la imagen)</p>
	
<p>Cilindros vibrados con vibrador</p>	<p>Cilindros vibrados con varilla</p>

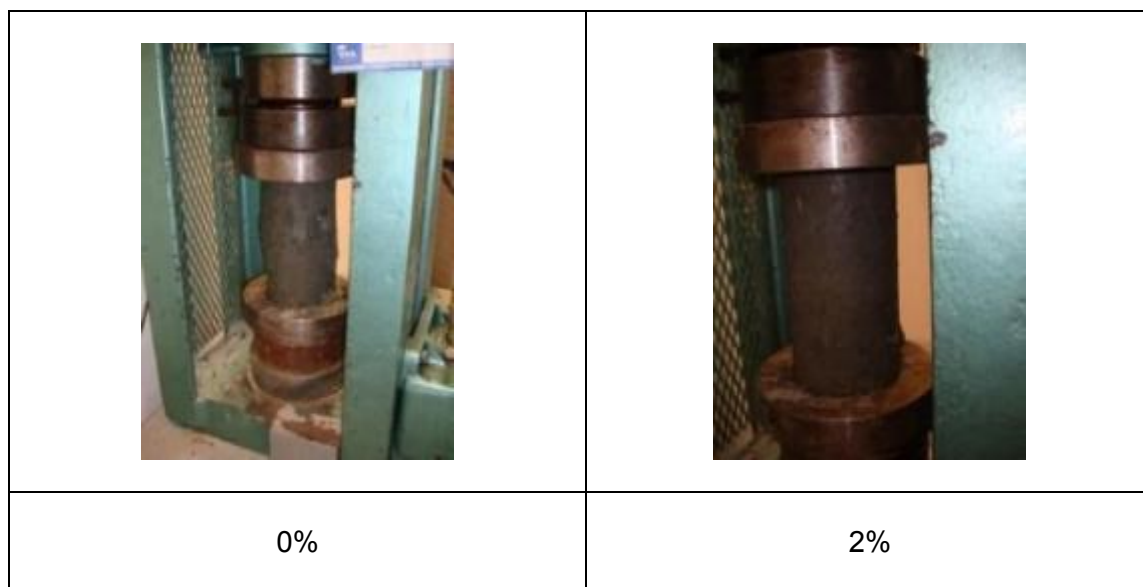
**Figura 18. Comparación entre cilindros vibrados con varilla y con vibrador.**



Los resultados de los cilindros que se repitieron son los que se reportan de la tabla 9 y la tabla 10.

**Tabla 9. Prueba de compresión a los 7 días de cilindros repetidos con diferentes dosificaciones de fibra.**

Dosificación	0%					
ID	Diámetro (mm)	Área de Sección Transversal (mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (kN)	Tipo de Fractura	Defectos en el Espécimen	Edad del Espécimen (días)
00_07_01	100	7853,98	109,03	Columnar	Matriz poco porosa	7
00_07_02	100	7853,98	104,58			7
Dosificación	2%					
02_07_01	100	7853,98	51,18	Cono y división	Matriz poco porosa	7
02_07_02	100	7853,98	52,51			7
Dosificación	3%					
03_07_01	100	7853,98	28,93	NA-Asentamiento	Matriz muy porosa	7
03_07_02	100	7853,98	30,26			7
Dosificación	4%					
04_07_01	100	7853,98	40,50	NA-Asentamiento	Matriz muy porosa	7
04_07_02	100	7853,98	42,28			7
Dosificación	5%					
05_07_01	100	7853,98	17,80	NA-Asentamiento	Matriz muy porosa	7
05_07_02	100	7853,98	25,37			7

Muestra de lo que se reportó en la tabla 9 se presenta en la figura 19.



	
3%	4%
	
5%	

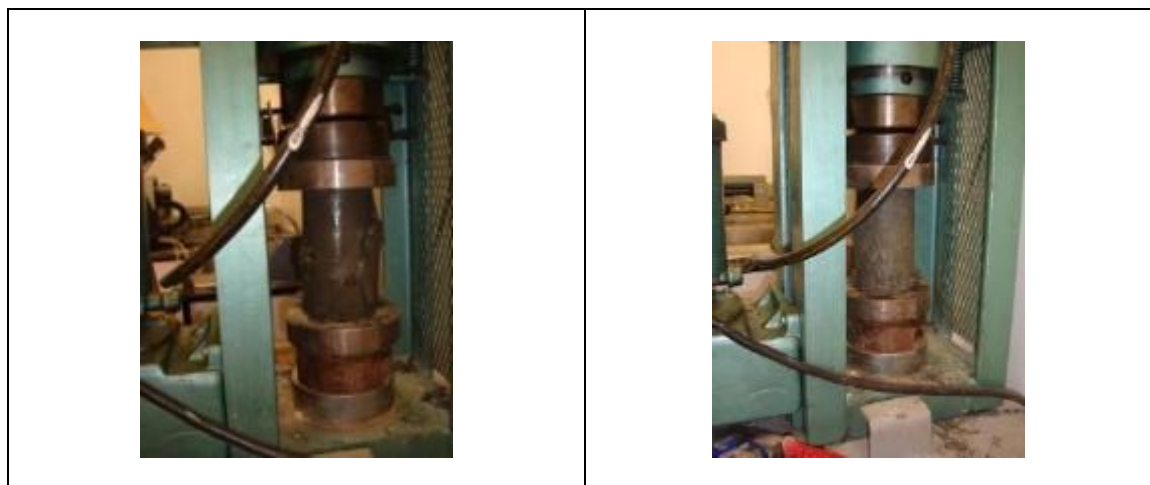
**Figura 19. Falla a los 7 días de cilindros repetidos de concreto con diferentes porcentajes de fibra.**

Los resultados a los 28 días de los cilindros repetidos no mostraron un cambio significativo en su comportamiento con respecto a los de los 7 días, se presentó un aumento en su resistencia pero esto fue por la edad de la pasta de cemento. A continuación se presentan los resultados de los cilindros a los 28 días vibrados con vibrador.




**Tabla 10. Prueba de compresión a los 28 días de cilindros repetidos con diferentes dosificaciones de fibra.**

Dosificación	0%					
ID	Diámetro (mm)	Área de Sección Transversal (mm²)	Carga Máxima (kN)	Tipo de Fractura	Defectos en el Espécimen	Edad del Espécimen (días)
00_28_01	100	7853,98	186,90	Cortante	Pocos poros	28
00_28_02	100	7853,98	178,00			28
00_28_03	100	7853,98	181,20			28
Dosificación	2%					
02_28_01	100	7853,98	93,45	Cono y división	Matriz poco porosa	28
02_28_02	100	7853,98	89,00			28
02_28_03	100	7853,98	80,10			28
Dosificación	3%					
03_28_01	100	7853,98	55,63	NA-Asentamiento	Matriz muy porosa	28
03_28_02	100	7853,98	35,60			28
03_28_03	100	7853,98	44,50			28
Dosificación	4%					
04_28_01	100	7853,98	55,63	NA-Asentamiento	Matriz muy porosa	28
04_28_02	100	7853,98	35,60			28
04_28_03	100	7853,98	75,65			28
Dosificación	5%					
05_28_01	100	7853,98	33,38	NA-Asentamiento	Matriz muy porosa	28
05_28_02	100	7853,98	22,25			28
05_28_03	100	7853,98	22,25			28

Muestra de lo que se reportó en la tabla 10 se presenta en la figura 20.





0%	2%
	
3%	4%
	
5%	

**Figura 20. Falla de cilindros repetidos a los 28 días de concreto con diferentes porcentajes de fibra.**

A modo de resumen se presentan los resultados gráficamente en la figura 21 y figura 22.

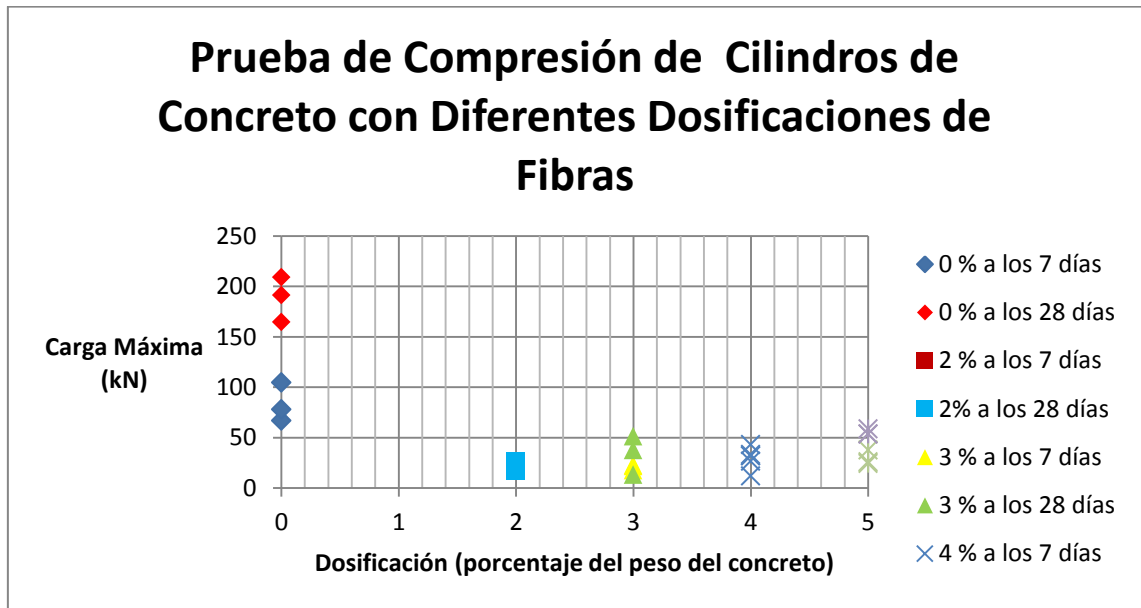


Figura 21. Resumen de resultados de los cilindros de concreto con diferentes dosificaciones de fibras.

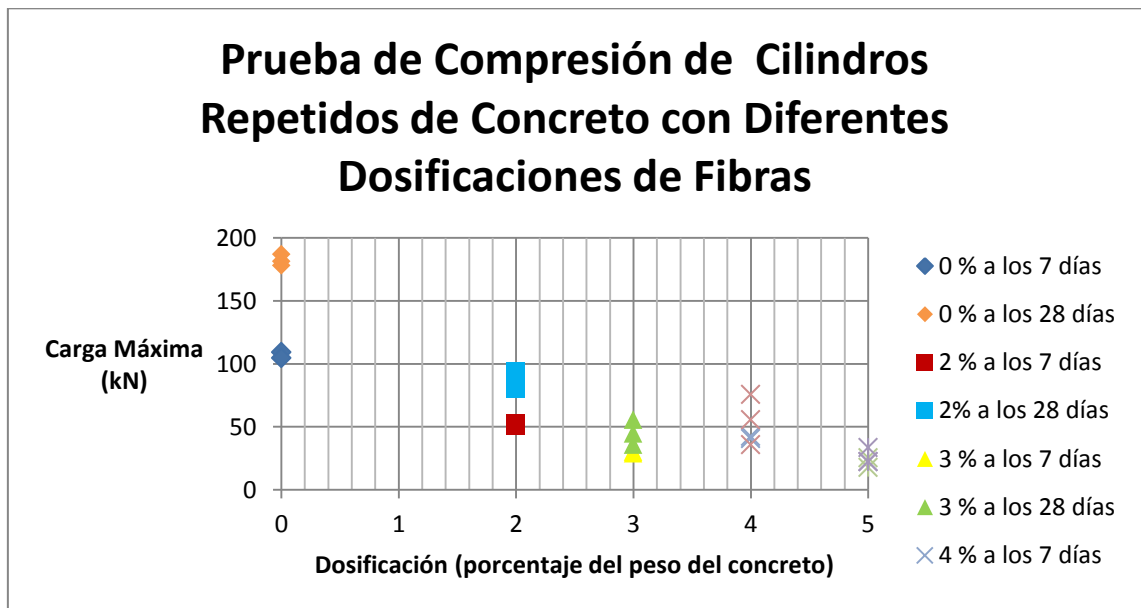


Figura 22. Resumen de resultados de los cilindros repetidos de concreto con diferentes dosificaciones de fibras.



**Vigas de Caracterización**

**Marco de Carga**

Se configuró el marco de carga para que se acogiera los estándares de la ASTM C293 para las vigas.

	
Cilindro neumático con apoyos	Compresor de aire
	
Adquisición de datos	Marco de carga

**Figura 23. Marco de carga.**

**Prueba**

	
Viga de caracterización	Falla de la viga de caracterización sin fibras
	
Falla de viga de caracterización con fibras	Disposición final

**Figura 24. Falla de vigas de caracterización.**

**Resultados**

En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos de las fallas de las vigas de caracterización tal y como lo especifica la ASTM C293 a los catorce y a los veintiocho días.

**Tabla 11. Falla de vigas de caracterización con cero por ciento de fibra a los catorce días.**

Dosificación	0%						
ID	Ancho Promedio (mm)	Altura Promedio (mm)	Longitud Entre Apoyos (mm)	Carga Máxima Aplicada (N)	Módulo de Rotura (MPa)	Defectos en el Espécimen	Edad del Espécimen en (días)
00_014_01	150	150,00	450	15781,1	3,16		14
00_014_02	150	150,00	450	10398	2,08		14
00_014_03	150	150,00	450	14800,8	2,96		14
Dosificación	2%						
02_014_01	150	150,00	450	23820,2	4,76	Pocos poros	14
02_014_02	150	150,00	450	13963	2,79	Muchos poros	14
02_014_03	150	150,00	450	18686,6	3,74	Pocos poros	14
Dosificación	3%						
03_014_01	150	150,00	450	18419,2	3,68	Pocos poros.	14
03_014_02	150	150,00	450	8865	1,77	Muchos poros.	14
03_014_03	150	150,00	450	16405	3,28	Pocos poros.	14
Dosificación	4%						
04_014_01	150	150,00	450	6191,3	1,24	Matriz muy porosa y con fibra expuesta.	14
04_014_02	150	150,00	450	18044,9	3,61		14
04_014_03	150	150,00	450	7670,7	1,53		14
Dosificación	5%						
05_014_01	150	150,00	450	12750,9	2,55	Matriz muy porosa y con fibra expuesta.	14
05_014_02	150	150,00	450	20255,2	4,05		14
05_014_03	150	150,00	450	8972	1,79		14

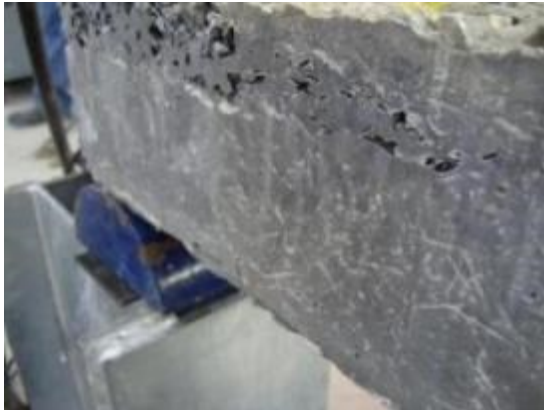
Muestra de lo que se reportó en la tabla 11 se presenta en la figura 25.



0%



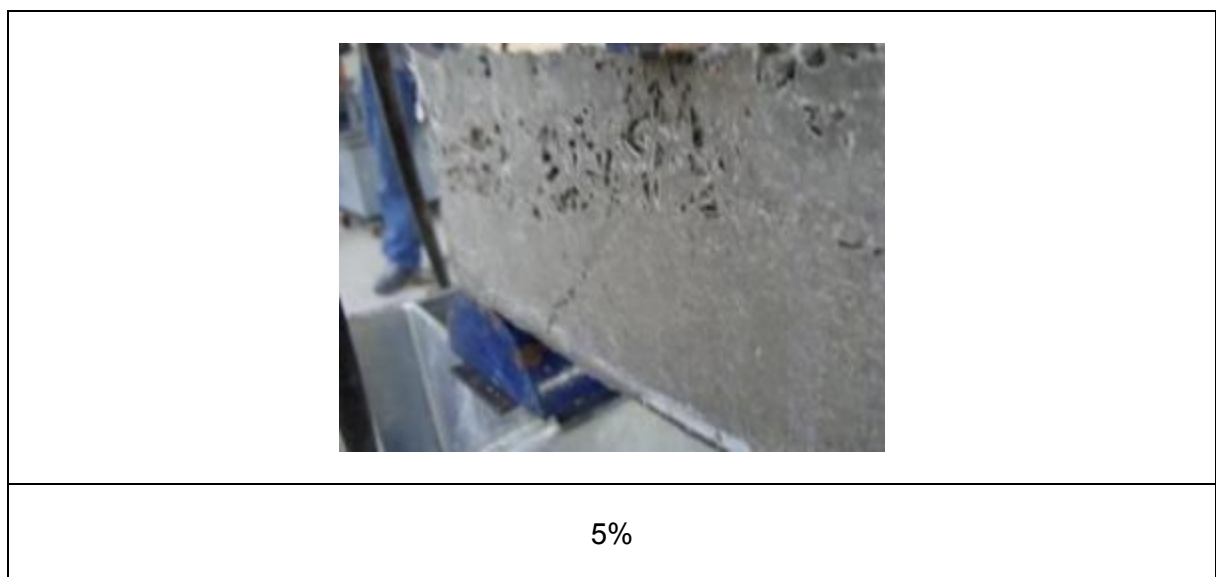
2%



3%



4%



**Figura 25. Falla de vigas de caracterización con diferentes dosificaciones de fibra los catorce días.**

Los resultados de la falla a los veintiocho días son:

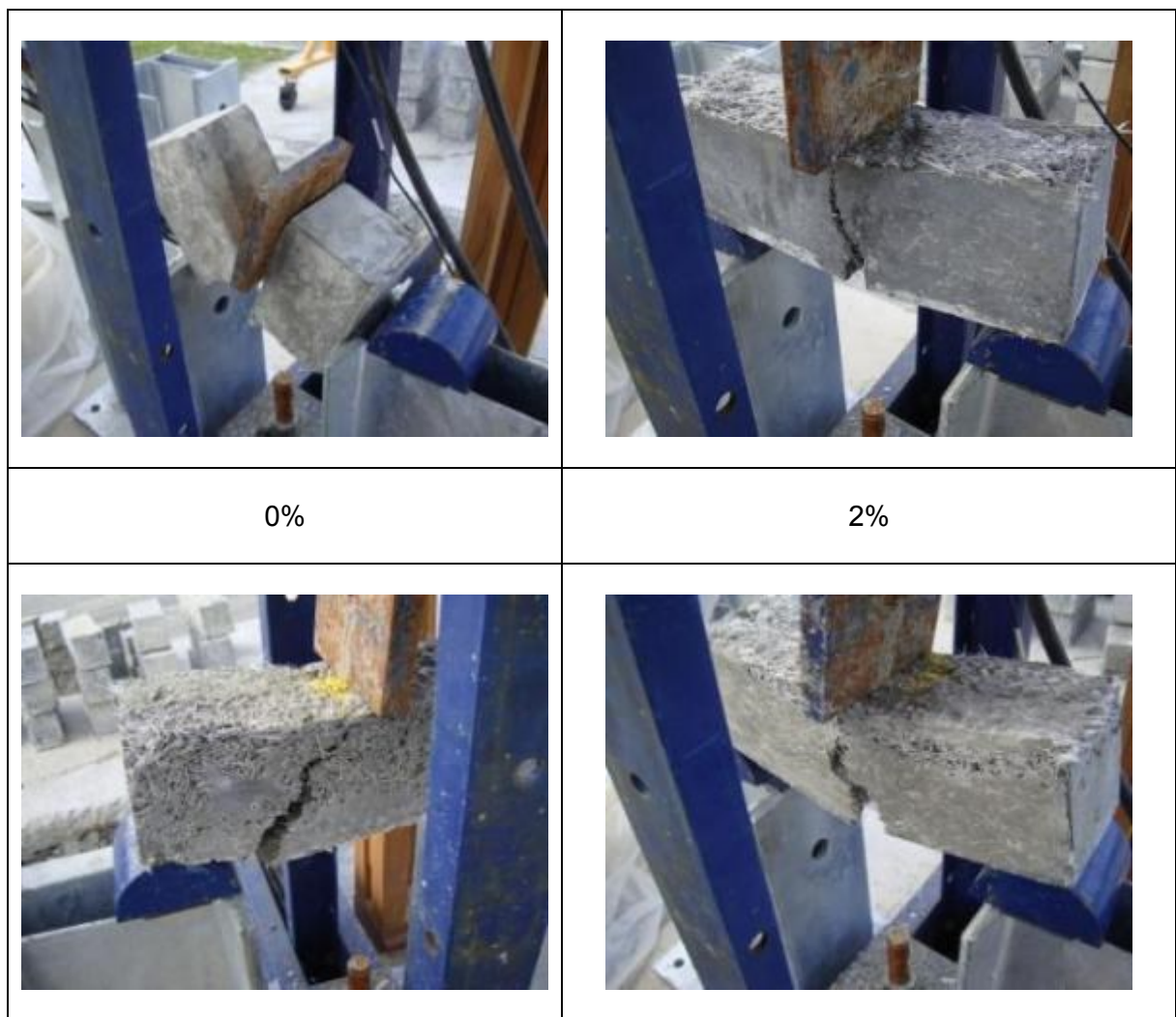
**Tabla 12. Falla de vigas de caracterización con cero por ciento de fibra a los veintiocho días.**

Dosificación	0%						
ID	Ancho Promedio (mm)	Altura Promedio (mm)	Longitud Entre Apoyos (mm)	Carga Máxima Aplicada (N)	Módulo de Rotura (MPa)	Defectos en el Espécimen	Edad del Espécimen (días)
00_028_01	150	150,00	450	20390,5	4,08	Ninguno	28
00_028_02	150	150,00	450	16400,7	3,28		28
00_028_03	150	150,00	450	20666,5	4,13		28
Dosificación	2%						
02_028_01	150	150,00	450	23836,5	4,77	Pocos poros.	28
02_028_02	150	150,00	450	22648,8	4,53	Pocos poros.	28
02_028_03	150	150,00	450	19236,2	3,85	Pocos poros.	28
Dosificación	3%						
03_028_01	150	150,00	450	15254,8	3,05	Matriz muy porosa con	28


						agregado y fibra expuesta.	
03_028_02	150	150,00	450	5845,1	1,17	Matriz sumamente porosa con agregado y fibra expuesta.	28
03_028_03	150	150,00	450	14978,8	3,00	Matriz muy porosa con agregado y fibra expuesta.	28
<b>Dosificación</b>	4%						
04_028_01	150	150,00	450	5845,1	1,17	Matriz muy porosa con agregado y fibra expuesta.	28
04_028_02	150	150,00	450	23435	4,69	Matriz porosa con agregado y fibra expuesta.	28
04_028_03	150	150,00	450	23644,1	4,73	Matriz porosa con agregado y fibra expuesta.	28
<b>Dosificación</b>	5%						
05_028_01	150	150,00	450	21369,1	4,27	Matriz porosa con agregado y fibra expuesta.	28
05_028_02	150	150,00	450	24204,5	4,84	Matriz	28

						porosa con agregado y fibra expuesta.	
05_028_03	150	150,00	450	15196,3	3,04	Matriz muy porosa con agregado y fibra expuesta.	28

Muestra de lo que se reportó en la tabla 12 se presenta en la figura 26.

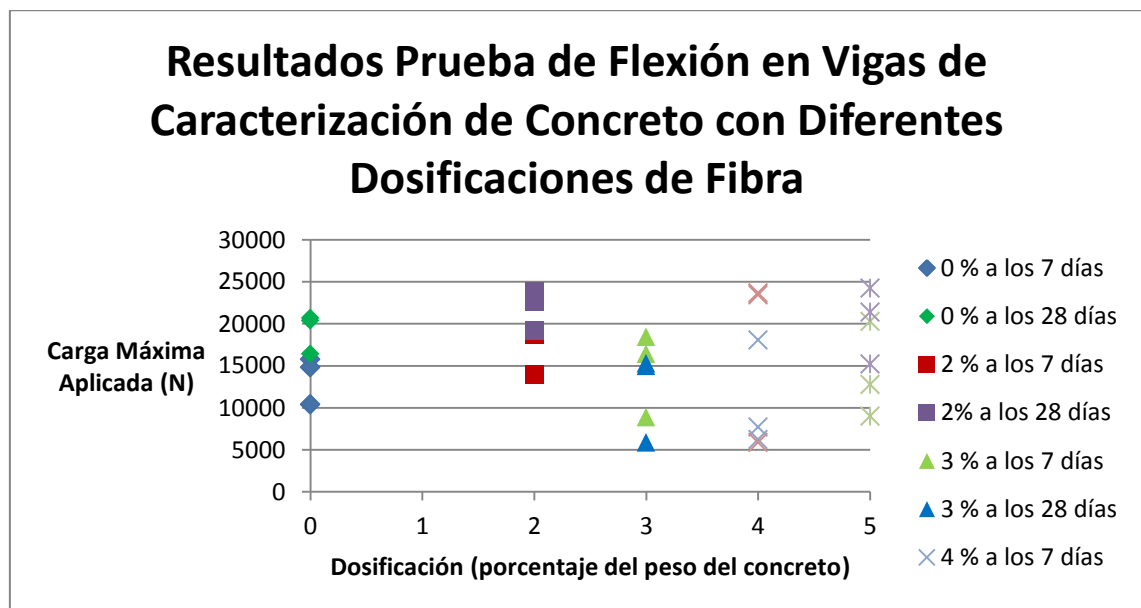




3%	4%
	
5%	

**Figura 26. Falla de vigas de caracterización con diferentes dosificaciones de fibra los veintiocho días**

A manera de resumen se presenta la figura 27.



**Figura 27. Resumen de resultados de las vigas de caracterización de concreto con diferentes dosificaciones de fibras.**



### 3.2.1 Viga

De acuerdo con lo que se estableció en la sección 2.4 y los resultados de la sección anterior el porcentaje de fibra que se debe implementar será del dos por ciento del peso del concreto.

#### Dimensionamiento

De acuerdo con la Tabla C.9.5 (a) de la NSR-10, las dimensiones que debería tener una viga de tres metros de longitud son 0,20 m de alto y 0,10 m de ancho. Vale aclarar que estas son las dimensiones típicas de viguetas (nervios) de losas unidireccionales para edificaciones de uso residencial.

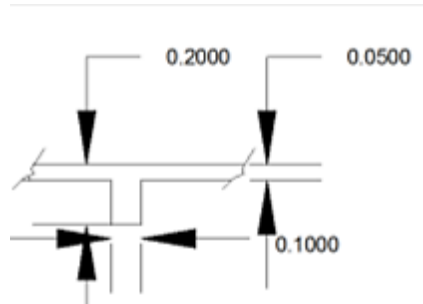


Figura 28. Sección de losa.

#### Carga Muerta (D)

Asumiendo un espesor de loseta de 50 mm y un ancho aferente de 2,5 veces el espesor de la losa (0,60 m) en correspondencia con el Título C de la NSR-10 y considerando que el nervio deberá soportar un cielo raso de tablero de yeso de 16 mm de espesor, con acabados de piso de baldosa cerámica de 20 mm sobre mortero de 12 mm y que cargará un muro en mampostería pañetado por ambos lados y con altura libre de 2,40 m con la misma longitud del nervio, se tendrá:

#### Peso loseta

Se utilizó la tabla B.3.2.1-1 de la NSR-10 para obtener el peso específico del concreto reforzado.

$$\text{Peso loseta} = \text{peso específico} * \text{espesor de loseta}$$

$$\text{Peso loseta} = 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 0,05 \text{ m}$$

$$\text{Peso loseta} = 1,20 \text{ kN/m}^2$$

#### Peso nervio

*Peso nervio*

$$= \frac{\text{peso específico} * \text{espesor nervio} * \text{altura nervio} * \text{longitud de nervio en el área rep.}}{\text{área representativa}}$$

$$\text{Peso nervio} = \frac{\left(24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 0,10 \text{ m} * 0,20 \text{ m} * 3 \text{ m}\right)}{1,80 \text{ m}^2} = 0,80 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### **Peso losa**

$$\text{Peso losa} = \text{peso loseta} + \text{peso nervio}$$

$$\text{Peso losa} = 1,20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0,80 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Peso losa} = 2,00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### **Peso cielo raso**

Se utilizó la tabla B.3.4.1-1 de la NSR-10 para determinar la carga del cielo raso.

*Peso cielo raso de tablero de yeso*

$$= \text{carga del tablero de yeso} * \text{espesor del tablero de yeso (en mm)}$$

$$\text{Peso cielo raso de tablero de yeso} = 0,0080 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2 * \text{mm}} * 16 \text{ mm}$$

$$\text{Peso cielo raso de tablero de yeso} = 0,13 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### **Peso de pisos y acabados**

Se utilizó la tabla B.3.4.1-3 de la NSR-10 para determinar la carga del piso y los acabados.

$$\text{Peso baldosa cerámica (20 mm) sobre 12 mm de mortero} = 0,80 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### **Peso de particiones**

Se utilizó la tabla B.3.4.3-1 de la NSR-10 para determinar la carga del muro.

$$\text{Peso particiones en mampostería de 2,40 m} = 2,40 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

La carga muerta corresponderá a la sumatoria de los pesos anteriormente establecidos.

*Carga muerta*

= peso losa + peso cielo raso + peso de pisos y acabados  
+ peso particiones

$$Carga\ muerta = 2,00 \frac{kN}{m^2} + 0,13 \frac{kN}{m^2} + 0,80 \frac{kN}{m^2} + 2,40 \frac{kN}{m^2}$$

$$Carga\ muerta = 5,33 \frac{kN}{m^2}$$

### **Carga Viva (L)**

Las cargas vivas se tomaron directamente de la tabla B.4.2.1-1, considerando el uso de la edificación como residencial.

$$Carga\ balcones = 5,0 \frac{kN}{m^2}$$

$$Carga\ cuartos\ privados\ y\ sus\ corredores = 1,8 \frac{kN}{m^2}$$

$$Carga\ escaleras = 3,0 \frac{kN}{m^2}$$

Particularmente para este caso se consideró que solo se utilizaría para el diseño la carga viva la de los cuartos privados y sus corredores, dado el que es la más común en una vivienda.

Así la carga de diseño tal y como lo establece la ecuación B.2.4-2 de la NSR-10 es:

$$Carga\ de\ diseño = 1,2 * D + 1,6 * L$$

$$Carga\ de\ diseño = 1,2 * 5,33 \frac{kN}{m^2} + 1,6 * 1,8 \frac{kN}{m^2}$$

$$Carga\ de\ diseño = 9,28 \frac{kN}{m^2}$$

Después de hacer un análisis estructural por medio del programa SAP 2000, se tiene que las solicitaciones presentadas que deberá atender una viga típica de uso residencial de tres metros de longitud son:

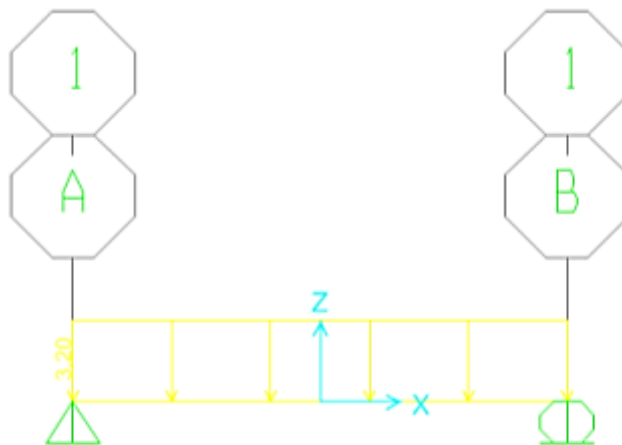


Figura 29. Carga muerta típica de un nervio de tres metros de una edificación de uso residencial. Figura del programa SAP2000.

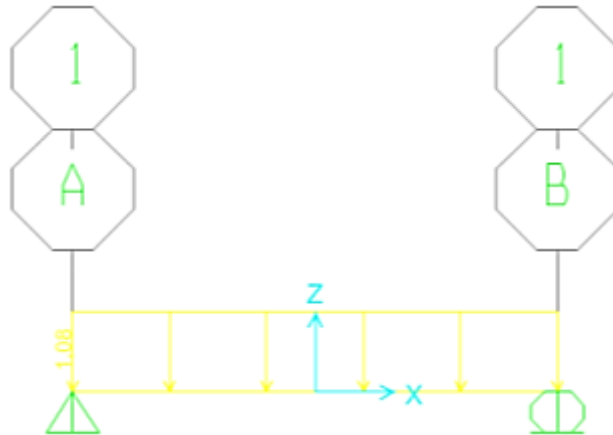


Figura 30. Carga viva típica de un nervio de tres metros de una edificación de uso residencial. Figura del programa SAP2000.

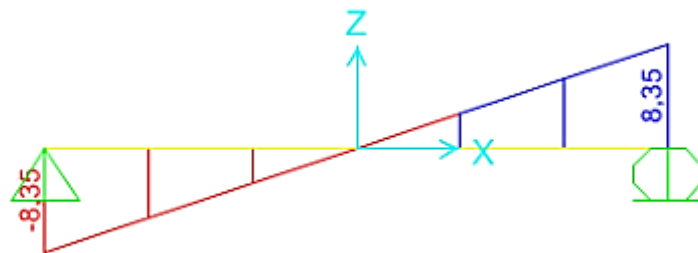
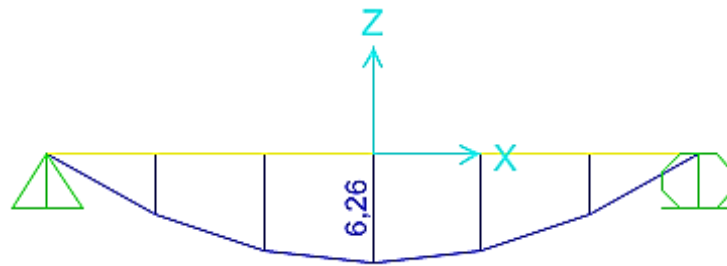


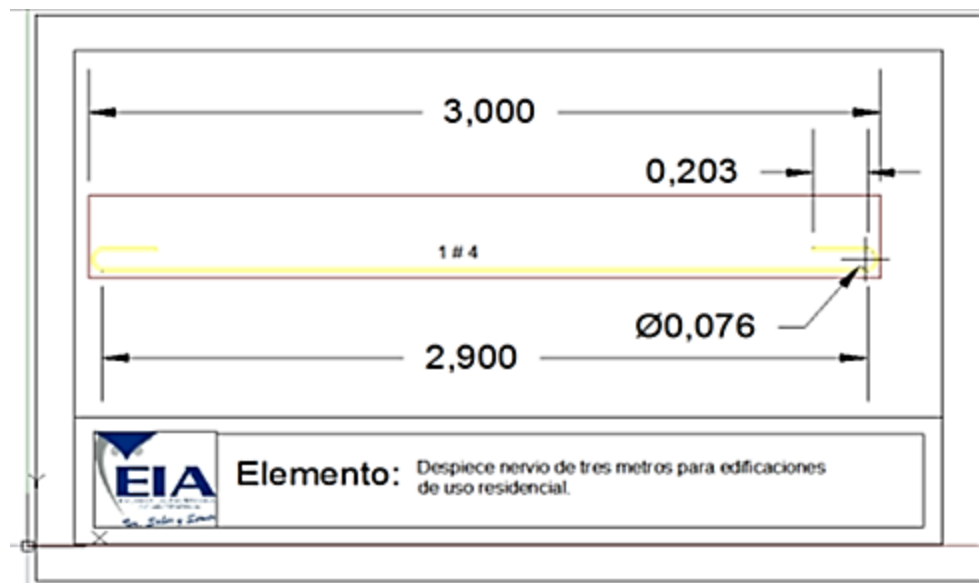
Figura 31. Diagrama de cortante típico de un nervio de tres metros de una edificación de uso residencial. Figura del programa SAP2000.



**Figura 32. Diagrama de momento típico de un nervio de tres metros de una edificación de uso residencial. Figura del programa SAP2000.**

Las unidades de los datos que se presentan en la figura 31 y en la figura 32 son kN y kN\*m respectivamente.

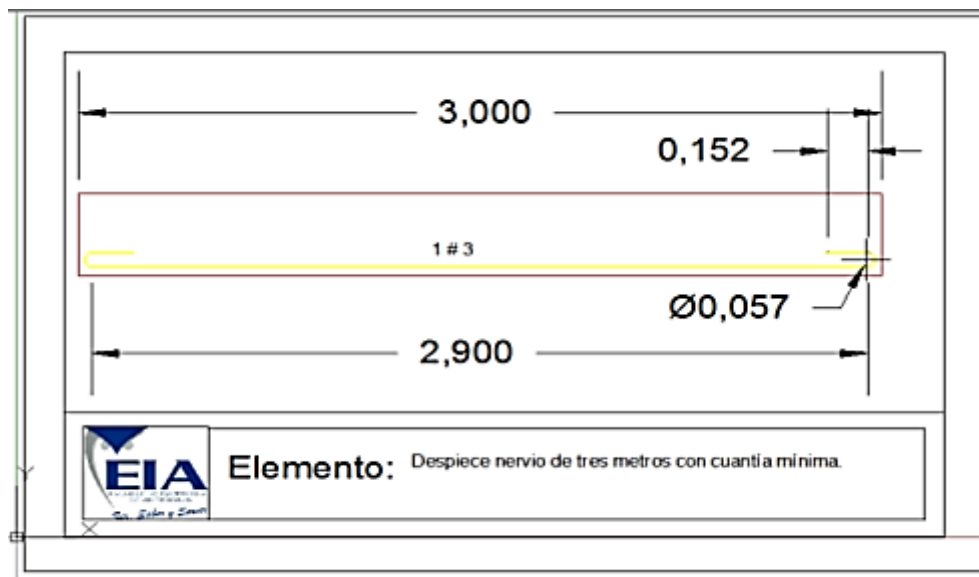
De esta forma, si se considera que el concreto es de 21 MPa, el acero de 420 MPa y los requisitos de la NTC-10 del título C (C.7.7, C.10.5, C.10.6, C.11.4, C.12.2, C.12.5 y C.12.10, C.12.11), se tendrá que el despiece de un nervio típico es:



**Figura 33. Despiece nervio típico de tres metros para edificaciones de uso residencial.**

Vale la pena aclarar que de acuerdo con lo que establece la NTC-10 en la sección C.11.4 no es necesario la utilización de refuerzo por cortante y de acuerdo con los cálculos desarrollados, el concreto es capaz de resistir las cargas de cortante.

Para el nervio con cuantía mínima de 0,0033 de acuerdo a lo que se dispone en el título C, en la sección 10.5 de la NSR-10 el despiece es:



**Figura 34. Despiece nervio de tres metros con cuantía mínima.**

La misma situación que se presentó en el nervio diseñado para cargas de edificaciones de uso residencial se presenta en el nervio con cuantía mínima con respecto al refuerzo por cortante.

### Formaleta

Se realizó la formaleta tal y como se presenta en la figura 35.



**Figura 35. Formaleta vigas**

## Mezcla

El diseño de mezcla que se presenta a continuación fue realizado para acoger las observaciones que se realizaron de la mezcla desarrollada para las vigas de caracterización, que se discuten en el título 4, siguiendo la metodología señalada en la sección 2.3.2. Así se tuvo:

### 1) Selección del asentamiento:

Entre 3 cm y 5 cm. Esto para obtener una consistencia semi-seca de acuerdo con lo que se señala en la tabla 11.3 de (Gúzman, 1993).

### 2) Selección del tamaño máximo nominal (TMN):

TMN de 19,05 mm (3/4 in).

### 3) Estimación del porcentaje de aire naturalmente atrapado:

Se utilizó la tabla 11.5 de (Gúzman, 1993), considerando una condición de aire naturalmente atrapado.

Obteniendo un 2% de aire naturalmente atrapado.

### 4) Estimación de la cantidad de agua para un metro cúbico:

Se uso la tabla 11.7 de (Gúzman, 1993), teniendo en cuenta que la contextura y la forma del material era rugosa y angulosa respectivamente.

Consiguiendo que era necesario  $199 \text{ kg/m}^3$  de agua.

### 5) Selección de la resistencia de diseño:

Al no tener posibilidad de hacer pruebas se escogió que la resistencia de diseño fuera de  $295 \text{ kgf/cm}^2$ , de acuerdo con la tabla 11.12 de (Gúzman, 1993).

### 6) Elección de la relación Agua-Cemento:

Usando la figura 11.4 de (Gúzman, 1993) y la línea media, se obtuvo que la relación de agua cemento debía ser de 0,48.

### 7) Determinación de la cantidad de cemento:

Con la cantidad de agua y la relación agua-cemento definida, la cantidad de cemento necesaria era de  $415 \text{ kg/m}^3$ .

### 8) Estimación de las proporciones de los agregados:

Usando el método gráfico que se describe en (Gúzman, 1993), se obtuvo que la dosificación con los materiales que se tenían que más se ajustaba a los ideales que se

proponen en la tabla 11.17 de (Gúzman, 1993) era del 65% para el agregado fino y del 35% para el grueso.

9) Volumen de agregados:

Se calculó el volumen de agregados para un metro cúbico y se obtuvo que era necesario 647,3 l/m<sup>3</sup>.

10) Cantidad de grava y arena:

Se determinó la densidad de cada uno de los agregados en el laboratorio y se obtuvo que la cantidad de arena y de grava que eran necesarias para la mezcla era de 1144 y 644 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

Vale la pena aclarar que la humedad de agregados era del 4 % (tanto para arena como para la grava).

Finalmente se obtuvieron las dosificaciones que se presentan a continuación.

**Tabla 13. Diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto de 21 MPa.**

Dosificación para un metro cúbico de concreto	
Cemento (kg)	415
Grava (kg)	616
Arena (kg)	1144
Agua (l)	199

Para verificar que la mezcla estuviese adecuadamente diseñada, se verificó el asentamiento, obteniendo un asentamiento de 4 cm, el cual está dentro del rango que se estableció en el diseño.





**Figura 36. Prueba de Asentamiento.**

Finalmente, se procedió a realizar la mezcla para las tres vigas adicionándole plastificante Sikafluid de acuerdo con lo que el fabricante indica (Sika, 2012) y corrigiendo la cantidad de agua por el aditivo y por la humedad de los agregados que fue del 5 % para la grava y del 7 % para la arena, tal y como se presenta en la tabla 14.

**Tabla 14. Diseño de mezcla para tres vigas de concreto 21 MPa con aditivo y dos con fibra.**

Dosificación para un metro cúbico de concreto	
Cemento (kg)	105
Grava (kg)	159
Arena (kg)	294
Agua (l)	49,5
Sikafluid (g)	1050
Fibra de vidrio (kg)	11,7

### **Vaciado**



**Figura 37. Vigas vaciadas.**

### **Curado**



**Figura 38. Curado de vigas.**

## Falla



Prueba de compresión de cilindros



Colocación de las vigas



Falla de las vigas

**Figura 39. Pruebas finales.**

### Resultados

#### De los Cilindros

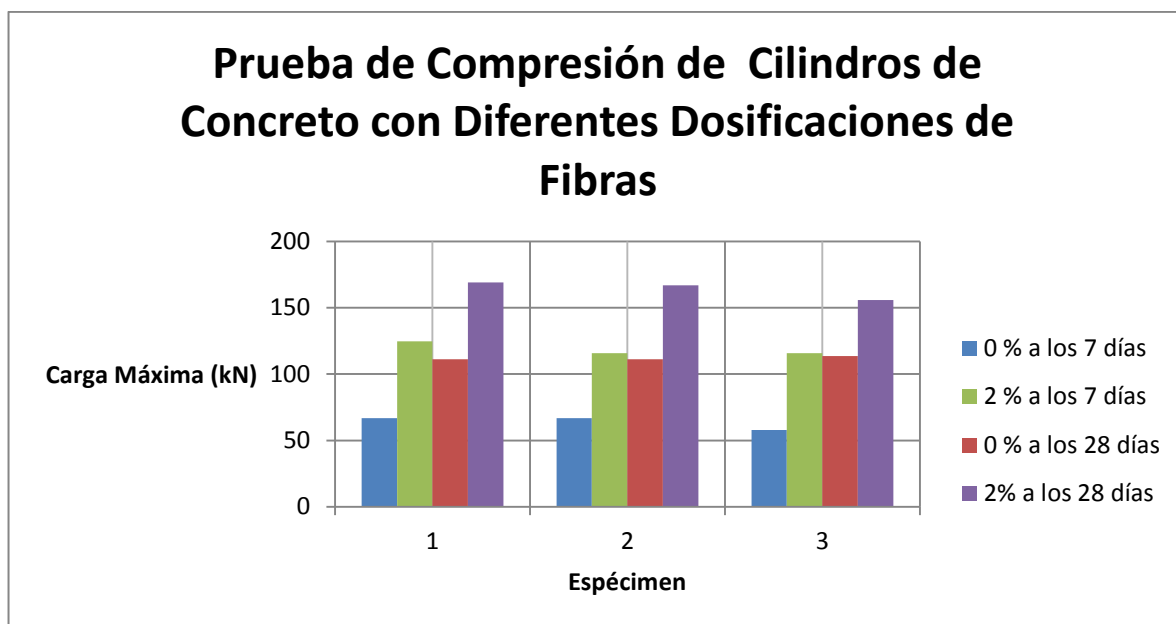
Se hicieron seis cilindros sin fibra y otros seis con una dosificación del dos 2% de fibra, de manera adicional se hicieron otros tres más pero con un molde de cilindro mayor (150 mm).

**Tabla 15. Prueba de compresión de cilindros con diferentes dosificaciones de fibra a diferentes edades.**

Dosificación	0%					
ID	Diámetro (mm)	Área de Sección Transversal (mm²)	Carga Máxima (kN)	Tipo de Fractura	Defectos en el espécimen	Edad del espécimen (días)
00_07_01	100	7853,98	66,75	Cortante	-	7
00_07_02	100	7853,98	66,75			7
00_07_03	100	7853,98	57,85			7
Dosificación	0%					
ID	Diámetro (mm)	Área de Sección Transversal (mm²)	Carga Máxima (kN)	Tipo de Fractura	Defectos en el espécimen	Edad del espécimen (días)
00_28_01	100	7853,98	111,25	Cortante	-	28
00_28_02	100	7853,98	111,25			28
00_28_03	100	7853,98	113,48			28

Dosificación	2%					
ID	Diámetro (mm)	Área de Sección Transversal (mm²)	Carga Máxima (kN)	Tipo de Fractura	Defectos en el espécimen	Edad del espécimen (días)
02_07_01	100	7853,98	124,60	Cono	-	7
02_07_02	100	7853,98	115,70			7
02_07_03	100	7853,98	115,70			7
Dosificación	2%					
ID	Diámetro (mm)	Área de Sección Transversal (mm²)	Carga Máxima (kN)	Tipo de Fractura	Defectos en el espécimen	Edad del espécimen (días)
02_28_01	100	7853,98	169,10	Cortante	Poros	28
02_28_02	100	7853,98	166,88		Muchos poros	28
02_28_03	100	7853,98	155,75		Poros	28
Dosificación	2%					
ID	Diámetro (mm)	Área de Sección Transversal (mm²)	Carga Máxima (kN)	Tipo de Fractura	Defectos en el espécimen	Edad del espécimen (días)
02_28_01	150	17671,46	356,00	Cortante	-	28
02_28_02	150	17671,46	333,75			28
02_28_03	150	17671,46	356,00			28

A manera de resumen se presenta la figura 40, donde no se presentan los resultados de la tabla 15.



**Figura 40. Resumen de resultados de los cilindros finales de concreto con diferentes dosificaciones de fibras.**

De las Vigas



**Tabla 16. Falla de vigas.**

Dosificación	Variada						
ID	Ancho Promedio (mm)	Altura Promedio (mm)	Longitud Entre Apoyos (mm)	Carga Máxima Aplicada (N)	Módulo de Rotura (MPa)	Defectos en el Espécimen en	Edad del Espécimen en (días)
Con 2% de fibra	100	200	2800	12490	13,11	Presencia de pocos poros	28
Con 2% de fibra y cuantía mínima	100	200	2800	11360	11,93	-	28
Con acero para edificaciones de uso residencial	100	200	2800	9700	10,19		28

A pesar de que no se pudo contar con una regleta electrónica que permitiera correlacionar la carga con la deformación, se midió ésta a través del uso de una regleta graduada a los 2 cm en el momento cuando se alcanzó la falla. De esta manera, las deformaciones que presentaron los elementos son:

**Tabla 17. Deformaciones.**

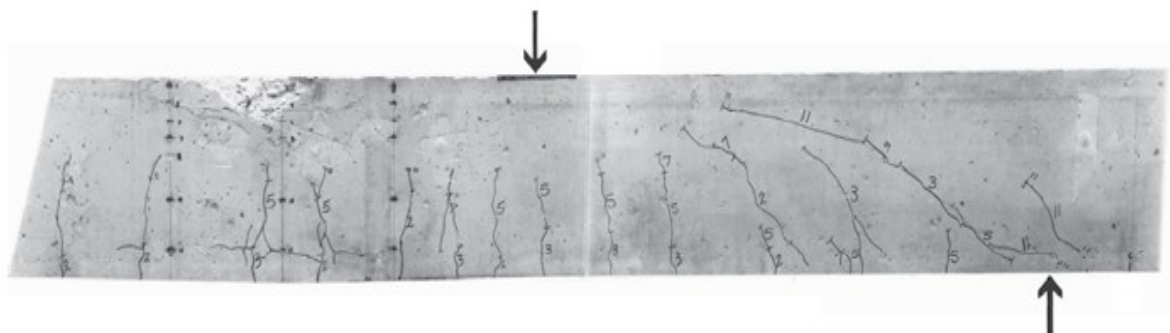
<b>Viga</b>	<b>Deflexión en el punto de aplicación de la carga (cm)</b>
Con 2% de fibra	2,5
Con 2% de fibra y cuantía mínima	3,0
Con acero para edificaciones de uso residencial.	5,0

<b>Viga</b>	<b>Falla</b>
Con 2% de fibra	
Con 2% de fibra y cuantía mínima	



<p>Con acero para edificaciones de uso residencial</p>	
--	--

**Figura 41. Fallas de vigas.**



**Figura 42. Fallas de una viga de concreto reforzada con acero sometida a flexión. Tomada de (James G. MacGregor, 2009).**

Las fisuras que se presentan en la figura 42 son grietas típicas de un ensayo de flexión, don las que se presentan con los números 5 son las que se producen por tracción en la zona de momento máximo, las del número 3 son una combinación de flexión con cortante y las que tienen el 11 son las de cortante por tracción diagonal.



### 3.3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA VIGA

De acuerdo a lo que se reportó en la sección anterior se ve que la viga de concreto microrreforzado fue capaz de soportar una carga superior (un 30 %) y una deformación mucho menor (50 %) a la de concreto reforzado con acero diseñado para edificaciones de uso residencial de acuerdo con la NSR-10.

### 3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE VIGAS MICRORREFORZADAS COMO ELEMENTOS PREFABRICADOS PARA EDIFICACIONES DE USO RESIDENCIAL

Se realizó la evaluación de las ventajas y desventajas de la implementación de las vigas de concreto microrreforzadas con fibras de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36, teniendo en cuenta el costo de la fabricación de cada una de las vigas caracterizadas en la sección anterior en un entorno de una industria de materiales prefabricados y los resultados mecánicos reportados con antelación para hacer una evaluación técnica.

Desde el punto de vista económico

ITEM:

UNIDAD: Un

**DESCRIPCIÓN:** Viga de Concreto Prefabricado de 20 cm x 10 cm y longitud 3 metros. Con refuerzo en acero.

#### 1. EQUIPO

DESCRIPCION	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	VALOR UNITARIO
Herramienta Menor	Gb	1	230,00	230
Vibrador	aguja	42.920	0,01	215
Equipo de encofrado viga	un	3.792	0,06	228
Equipo de transporte concreto	m3	46.400	0,06	2.784
SUB-TOTAL				<b>3.456</b>

#### 2. MATERIALES

DESCRIPCION	UNIDAD	VR. UNITARIO	CANTIDAD	VALOR TOTAL
Concreto de 210Kg/cm2	m3	261.865	0,06	15.712
Refuerzo	kg	2.900	3,000	8.700
SUB-TOTAL				<b>24.412</b>

#### 3. TRANSPORTE

DESCRIPCION	UNIDAD	PRECIO UNIT.	RENDIM.	VR. PARCIAL
SUB-TOTAL				

#### 4. MANO DE OBRA

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PRECIO UNIT.	RENDIM.	VR. PARCIAL
Vaciado Viga	Un	4.600	1,00	4.600
SUB-TOTAL				<b>4.600</b>

#### 5. TOTAL COSTOS DIRECTOS

**32.468**

#### 6. COSTOS INDIRECTOS

#### 7. TOTAL PRECIO UNITARIO

**32.468**

**Figura 43. Evaluación económica de una viga de concreto prefabricado de 20 cm x 10 cm y 3 m de longitud con acero para edificaciones de uso residencial.**

ITEM:

UNIDAD: Un

**DESCRIPCIÓN:** Viga de Concreto Prefabricado de 20 cm x 10 cm y longitud 3 metros. Con refuerzo en acero y fibra.

**1. EQUIPO**

DESCRIPCION	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	VALOR UNITARIO
Herramienta Menor	Gb	1	230,00	230
Vibrador	aguja	42.920	0,01	215
Equipo de encofrado viga	un	3.792	0,06	228
Equipo de transporte concreto	m3	46.400	0,06	2.784
			SUB-TOTAL	<b>3.456</b>

**2. MATERIALES**

DESCRIPCION	UNIDAD	VR. UNITARIO	CANTIDAD	VALOR TOTAL
Concreto de 210Kg/cm2	m3	261.865	0,06	15.712
Refuerzo	kg	2.900	1,680	4.872
Fibra de vidrio álcali resistente	kg	9.800	2,880	28.224
			SUB-TOTAL	<b>48.808</b>

**3. TRANSPORTE**

DESCRIPCION	UNIDAD	PRECIO UNIT.	RENDIM.	VR. PARCIAL
			SUB-TOTAL	

**4. MANO DE OBRA**

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PRECIO UNIT.	RENDIM.	VR. PARCIAL
Vaciado Viga	Un	4.600	1,00	4.600
			SUB-TOTAL	<b>4.600</b>

**5. TOTAL COSTOS DIRECTOS**

**56.864**

**6. COSTOS INDIRECTOS**

**7. TOTAL PRECIO UNITARIO**

**56.864**

**Figura 44. Evaluación económica de una viga de concreto prefabricado de 20 cm x 10 cm y 3 m de longitud con acero de cuantía mínima y con 2% de fibra de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36.**

ITEM:	UNIDAD: Un	DESCRIPCIÓN: Viga de Concreto Prefabricado de 20 cm x 10 cm y longitud 3 metros. Con fibra.		
1. EQUIPO				
DESCRIPCION	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	VALOR UNITARIO
Herramienta Menor	Gb	1	230,00	230
Vibrador	aguja	42.920	0,01	215
Equipo de encofrado viga	un	3.792	0,06	228
Equipo de transporte concreto	m3	46.400	0,06	2.784
			SUB-TOTAL	3.456
2. MATERIALES				
DESCRIPCION	UNIDAD	VR. UNITARIO	CANTIDAD	VALOR TOTAL
Concreto de 210Kg/cm2	m3	261.865	0,06	15.712
Fibra de vidrio álcali resistente	kg	9.800	2,880	28.224
			SUB-TOTAL	43.936
3. TRANSPORTE				
DESCRIPCION	UNIDAD	PRECIO UNIT.	RENDIM.	VR. PARCIAL
			SUB-TOTAL	
4. MANO DE OBRA				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PRECIO UNIT.	RENDIM.	VR. PARCIAL
Vaciado Viga	Un	4.600	1,00	4.600
			SUB-TOTAL	4.600
5. TOTAL COSTOS DIRECTOS				51.992
6. COSTOS INDIRECTOS				
7. TOTAL PRECIO UNITARIO				51.992

**Figura 45. Evaluación económica de una viga de concreto prefabricado de 20 cm x 10 cm y 3 m de longitud con 2% de fibra de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36.**

De acuerdo a lo que se presentó en la figura 44 y la figura 45, en relación con la figura 43. La producción de una viga de concreto microrreforzado con fibras de vidrio Cem FIL HP 67/36 es económicamente inviable para la industria del prefabricado y más aun para las construcciones del medio. Esto se debe al alto costo de adquisición de la fibra en relación al del acero al término del segundo periodo del 2012.

### Desde el punto de vista técnico

Las vigas de concreto microrreforzadas con fibras de vidrio Cem FIL HP 67/36 de una sección de 10 cm de ancho por 20 cm de alto y 3 m de longitud, son capaces de soportar cargas mayores y deflexiones menores a la de una viga de concreto de las mismas dimensiones reforzada con acero, diseñada para edificaciones de uso residencial en conformidad a la NSR-10. A pesar de ser capaz de soportar cargas mayores, su modo de falla sería peligroso para los usuarios si se sobrepasa la carga que es capaz de soportar, por lo que es necesaria la utilización de varillas de acero.

## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el momento de realizar la mezcla de concreto simple con los diferentes porcentajes de dosificación de las fibras, se evidenció la absorción del agua por parte de las fibras, lo que conlleva a matrices sumamente porosas y manejabilidades bajas, dando como resultado que el aumento en el porcentaje de fibra conllevara a un inadecuado proceso de fraguado y la matriz cementante no pudiera formarse, de ahí que los resultados obtenidos en los cilindros y en las vigas de caracterización no concordaran con lo que teóricamente se esperaba en cuanto a la capacidad portante se refiere.

Durante la ejecución de las pruebas de compresión y flexión de los cilindros y las vigas de caracterización respectivamente, se observó que los elementos que se encontraban microrreforzados no presentaron una falla súbita (típica de los elementos frágiles), por el contrario, se evidenció el trabajo de la fibra a cargas axiales a pesar su dispersión en la matriz de concreto. Es así como se puede afirmar que la adición de fibras de vidrio álcali resistentes Cem FIL HP 67/36 al concreto, permite que los elementos de concreto tengan en alguna medida algo de ductilidad en función de la dosificación que se utilice.

A partir de lo que se evidenció en la figura 21, en comparación lo de la figura 22 se puede decir que la utilización de vibrador ayuda a que se tenga una matriz más homogénea, la cual permite que la mezcla de los elementos que la conforman pueda trabajar para resistir la carga a la que se le somete y se tenga un rango de variación menor.

Al analizar la forma de falla que presentaron las vigas de caracterización tal y como lo evidencian la figura 25 y la figura 26 vemos que el aumento en el porcentaje de fibra permite que los elementos fallen por tracción diagonal (cortante) en lugar de fallar por tracción en la fibra más solicitada por la flexión.

A pesar de los resultados reportados en la figura 27, éstos no pueden ser tomados como relevantes, dada la dispersión que presentan, es así como no se pudo hacer una correlación entre el MOR y el  $f'_c$  (a excepción del concreto simple). Esto se debió a la adsorción de la fibra que no se identificó previamente.

Las mezclas de concreto microrreforzado con fibras de vidrio álcali resistentes Cem FIL HP 67/36 han de usar superplastificantes, relaciones de agua-cemento medias a altas, agregados gruesos con TMN menor que 19,05 mm (3/4 in), proporciones de agregado fino mayores que las de agregado grueso y hacer una corrección por humedad para considerar la absorción del agua por parte de la fibra (cerca del 30 % del peso de la fibra - anexo 1).

Al ver los resultados presentados en la figura 40, se puede afirmar que al acoger las correcciones mencionadas en el párrafo anterior (a excepción de la absorción de la fibra), se logró obtener un concreto de mayor resistencia a compresión (cerca del 50 por ciento adicional), lo cual ayudó a que la fuerza de compresión en las vigas aumentase permitiendo tener un momento resistente mayor, conllevando a un aumento en las cargas que fueran capaces de soportar, obteniendo así los resultados de la tabla 16.

Tal y como se muestra en la figura 41, en relación con la figura 42, la falla de las vigas con acero fue por tracción en la zona de mayor momento, mientras que la de la fibra fue por cortante y flexión, lo cual evidencia el trabajo de la fibra a la solicitación que se esperaba fuese capaz de atender.

Al realizar una evaluación expos del estado de la fibra en la sección de la viga fallada, se vio que la fibra no presentó un deshilachamiento, en su lugar se dio un deslizamiento, lo cual muestra que éste elemento reforzante no cumple una de las condiciones necesarias para garantizar el funcionamiento adecuado del elemento.

De acuerdo a lo que se presenta en: la tabla 16, tabla 17, figura 43, figura 44 y la figura 45 se podrá decir que la implementación de fibras de vidrio álcali resistentes Cem FIL HP 67/36 es viable desde el punto de vista técnico, siempre y cuando se acojan las recomendaciones mencionadas en 3.4 y desde el punto de vista económico, por lo menos al termino del segundo semestre del 2012 no lo es.

## 5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

- La fibra de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36 presenta un comportamiento adecuado en la interacción con el concreto.
- Para garantizar una manejabilidad adecuada en el mezcla de concreto con fibras de vidrio álcali resistentes Cem FIL HP 67/36 se han de diseñar mezclas que cuenten con una proporción mayor de arena que de grava, una relación agua cemento media a alta, contar con superplastificantes que permitan que ésta sea más fluida para mejorar su trabajabilidad y la apariencia de los elementos y considerar en la corrección por humedad la absorción de la fibra.
- Han de utilizarse métodos de vibrado que garanticen una matriz de cemento sin poros, para que el material compuesto funcione adecuadamente.
- La adición de fibra de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36 de manera dispersa permite que la fisura que se produce al momento de la falla, se genere por tracción diagonal (cortante) en lugar de fallar por flexión, satisfaciendo así la sollicitación que se esperaba fuera capaz de atender.
- A pesar del alto costo de las fibras de vidrio Cem FIL HP 67/36 en relación con el acero, éstas se pueden implementar para reforzar elementos estructurales tipo viga para losas prefabricadas en edificaciones de uso residencial, pero deberán de estar acompañados con acero.
- Es necesario seguir haciendo investigaciones en la implementación de las fibras de vidrio Cem FIL HP 67/36 para ser utilizadas en elementos estructurales tipo viga para losas prefabricadas en edificaciones de uso residencial, para así obtener una muestra más grande y representativa de los resultados obtenidos, realizando variaciones en las dimensiones, dosificaciones, ciclos de carga y descarga, y variaciones térmicas.

### Recomendaciones.

- Hacer pruebas de absorción de la fibra a implementar y seguir todos los pasos de diseño de mezclas de concreto.
- Humedecer las fibras con antelación a la mezcla, de manera que ésta no altere la cantidad de agua demandada por la mezcla original.
- Evaluar la liberación del agua absorbida por la fibra.
- Usar mesas vibratorias.

### Posibles Temas de Investigación.

- Mezclas de concreto con reemplazo parcial o total de uno o varios de los agregados granulares por fibra de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36.
- Evaluar el comportamiento de losas de concreto microrreforzadas con fibras de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36 que se vean expuestas a cambios de temperatura. De modo que se pueda evitar la microfisuración de las mismas.
- Caracterizar mecánicamente una viga rectangular de concreto con fibras de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36 dispuesta en la zona de tracción.
- Caracterizar mecánicamente una viga rectangular de concreto con fibras de vidrio álcali resistente Cem FIL HP 67/36 con diferentes cuantías de acero.



## ***BIBLIOGRAFÍA***

- A. Sivakumar, M. S. (2007). Mechanical Properties of High Strength Concrete Reinforced with Metallic and Non-Metallic Fibres. *Cement & Concrete Composites*, 603-608.
- ACI Committee. (1999). *Desing Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*. ACI.
- Ali, M. (2012). Natural Fibres as Construction Materials. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 80-89.
- Álvarez, A. B. (abril de 2010). *Universitat Politècnica de Catalunya*. Recuperado el 23 de junio de 2012, de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6557/6/05.pdf>
- Álvarez, J. L. (julio de 2003). *Universitat Politècnica de Catalunya*. Recuperado el 26 de junio de 2012, de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6198/4/03.pdf>
- American Concrete Institute. (1999). *Desing Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*. ACI.
- American Concrete Institute. (1999). *Measurament of Properties of Fiber Reinforced Concrete*.
- American Concrete Institute. (2002). *State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete*.
- American Concrete Institute. (2006). *Reinforcement for Concrete Materials and Applications*.
- American Standard Methods. (2001). C39. ASTM International.
- American Standard Methods. (2002). C192. ASTM International.
- American Standard Methods. (2003). C31. ASTM International.
- American Standard Methods. (2010). C293. ASTM International.
- Andrejs Krasnikovs, V. L. (2007). Non-Traditional Reinforcement for Concrete Composites-State of the Art. *Transport And Engineering*, 191-200.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Norma Sismo Resistente 2010*. Bogotá.
- Banthia, N. (s.f.). *Wantancon*. Recuperado el 28 de Julio de 2012, de [http://watancon.com/documentation/technical/Banthia\\_-\\_Fibre-Reinforced\\_Concrete.pdf](http://watancon.com/documentation/technical/Banthia_-_Fibre-Reinforced_Concrete.pdf)
- CD3WD. (s.f.). Recuperado el 23 de junio de 2012, de [http://www.cd3wd.com/cd3wd\\_40/cd3wd/construc/sk01ae/es/SK01MS0A.HTM](http://www.cd3wd.com/cd3wd_40/cd3wd/construc/sk01ae/es/SK01MS0A.HTM)

- Dong Joo Kim, S. H. (2011). Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers. *Construction and Building Materials* 25, 4144-4155.
- Edward G. Nawy, D. P. (2008). Fiber-Reinforced Composites. En D. P. Edward G. Nawy, *Concrete Construction Engineering Handbook* (págs. 1-28).
- Ferdinand P. Beer, E. R. (2010). *Mecánica de Materiales*. Ciudad de México: Mc Graw Hill.
- Goez, M. C., Viera, L. F., & Sierra, J. C. (1987). Evaluación de Mezclas de Concreto de 210 kg-cm<sup>2</sup> reforzado con fibras de polipropileno. Envigado.
- Goez, Y. d. (31 de 07 de 2012). Profesor. (L. V. Negrette, Entrevistador)
- Gómez, D. J., & Mejía, D. L. (2012). Suelos Reforzados con Fibras Naturales. Envigado.
- Grisales, P. A. (19 de 07 de 2012). Ingeniera. (L. V. Negrette, Entrevistador)
- Gúzman, D. S. (1993). *Tecnología del Concreto y del Mortero*. Bogotá: Bhandar Editores Ltda.
- Hibbeler, R. (2006). *Mecánica de Materiales*. Ciudad de México: Pearson Prentice Hall.
- H-T Hu, F.-M. L.-T.-F.-C. (2010). Constitutive modeling of reinforced concrete and prestressed concrete structures strengthened by fiber-reinforced plastics. *Composite Structures* 92, 1640-1650.
- Huanzi Wnag, A. B. (2011). Ductility of fiber-reinforced-concrete beams reinforced with FRP rebars. *Construction and Building Materials* 25, 2391-2401.
- IMCYC. (Agosto de 2003). Recuperado el 28 de Julio de 2012, de <http://www.imcyc.com/cyt/agosto03/metlicas.htm>
- IMCYC. (Febrero de 2007). Recuperado el 20 de Julio de 2012, de <http://www.imcyc.com/ct2007/feb07/PROBLEMAS.pdf>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificados. (2010). *NTC 673*. Bogotá: ICONTEC.
- James G. MacGregor, J. K. (2009). *Reinforced Concrete Mechanics and Design*. Pearson.
- Nilson, A. H. (2001). *Diseño de Estructuras de Concreto*. Bogotá: McGrawHill.
- Owens Corning. (s. f.). *Cem-FIL GRC*. JS/ESPAÑA.
- P. Asokan, M. O. (2010). Improvement of the mechanical properties of glass fibre reinforced plastic waste powder filled concrete. *Construction and Building Materials* 24, 448-460.

- Razmig Shamim, A. S. (2009). *Flexural Testing of Concrete Beams Reinforced with Synthetic Fibers*.
- Sammer Hamoush, T. A.-L. (2010). Deflection Behaviour of Concrete Beams Reinforced with PVA Micro-Fibers. *Construction and Building Materials*, 2286-2293.
- Saraz, J. A., Aristizabal, F. V., & Mejía, J. A. (2007). *Comportamiento Mecánico del Concreto Reforzado con Fibras de Bagazo de Caña de Azúcar*. Medellín.
- Sika. (2012). *Sikafluid*. Sika Colombia.
- The Northeast Forest University. (2007). Recuperado el 17 de 11 de 2012, de [http://jpkc.nefu.edu.cn/jgsjyl/News\\_View.asp?NewsID=119](http://jpkc.nefu.edu.cn/jgsjyl/News_View.asp?NewsID=119)
- Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. (s.f.). Recuperado el 23 de Agosto de 2012, de <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/Lecciones/Capitulo%203/COMPOSICION%20DEL%20CONCRETO%20SIMPLE.htm>
- Wang, Y., Wu, H. C., & Li, V. C. (2000). *Concrete Reinforcement with Recycled Fibers*.

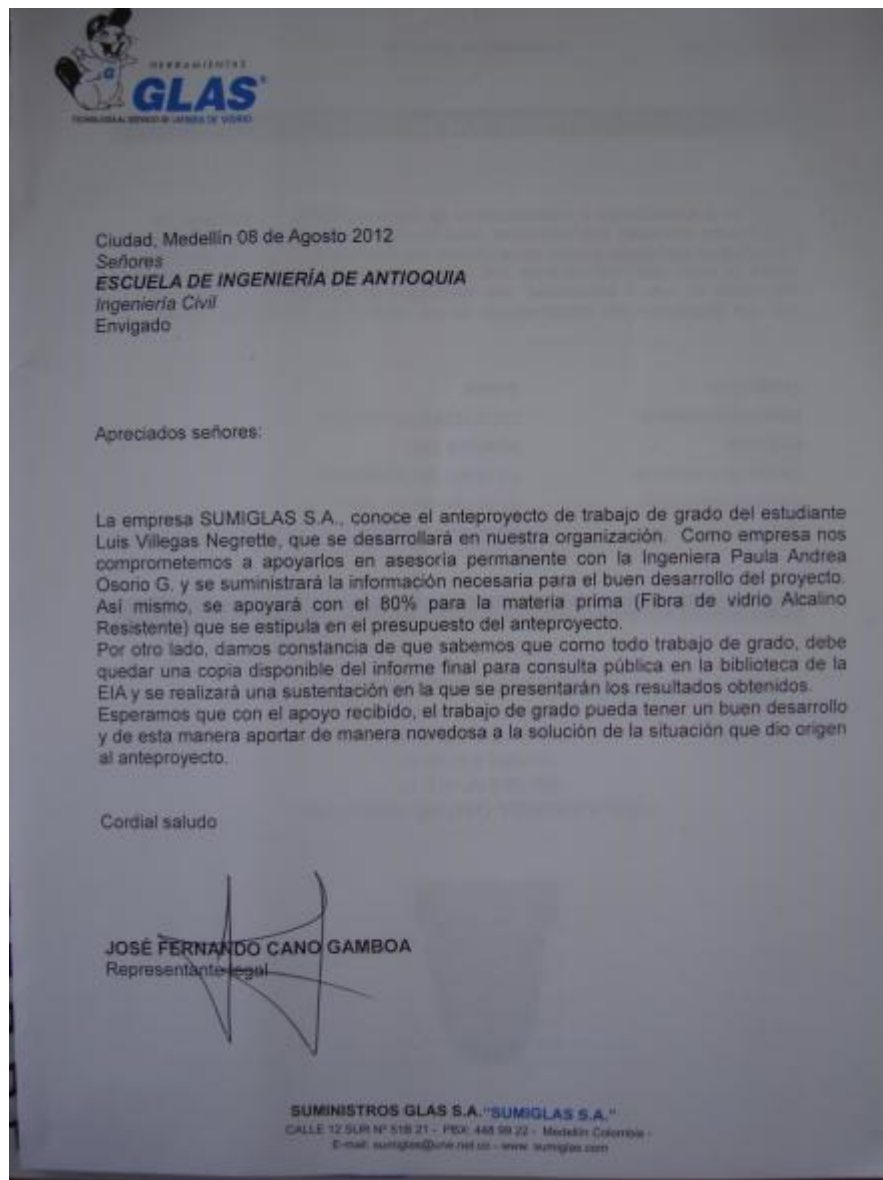
## ANEXO



### Anexo 1. Prueba de Absorción.

De éste anexo vale la pena aclarar el procedimiento que se llevó a cabo, que fue:

1. Tomar una cantidad determinada de fibra y pesarla.
2. Dejarla saturar durante un minuto en agua (tiempo que se deja la fibra en la mezcla, tal y como se presento en la figura 7).
3. Escurrirla con un colador, de modo que no quedara agua en los intersticios de las fibras.
4. Pesar un recipiente y poner en ceros la bascula con el recipiente en ella.
5. Depositar la fibra en el recipiente anteriormente mencionado.
6. Obtener la absorción.




**Anexo 2. Carta de compromiso por parte de SUMIGLAS S.A. para la entrega del 80% de la cantidad de fibra necesaria para el proyecto.**



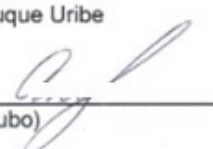
## ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA

### ACTA DE EVALUACIÓN FINAL DE TRABAJO DE GRADO

Fecha: (dd/mm/aa)	22 de noviembre de 2012								
Nombre del proyecto:	Viga de concreto micro- reforzado para losas prefabricadas en edificaciones de uso residencial.								
Director del proyecto:	Maria del Pilar Duque Uribe								
<table border="1"> <tr> <td>Nombre del estudiante</td> <td>Programa académico</td> </tr> <tr> <td>Luis Villegas Negrette</td> <td>Ingeniería Civil</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>	Nombre del estudiante	Programa académico	Luis Villegas Negrette	Ingeniería Civil					
Nombre del estudiante	Programa académico								
Luis Villegas Negrette	Ingeniería Civil								
Nombre del Jurado:									
Evaluación del proyecto: Espacio exclusivo para jurado									
___ No aprobado ___ Aprobado sin mención <input checked="" type="checkbox"/> con Mención Pública ___ con Mención honorífica ___ Trabajo laureado									
<b>Justificación del reconocimiento:</b> (Artículo 28 del Acuerdo 11: "El director del Programa presentará el acta final de evaluación al Consejo Académico, donde consta la solicitud de mención especial debidamente justificada y el Consejo determinará si se otorga o no"). La justificación debe tener mínimo 500 palabras.									

  
 DIRECTOR DEL PROGRAMA  
 Maria del Pilar Duque Uribe

  
 DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

  
 JURADO (Si lo hubo)

JURADO (Si lo hubo)